

Měření na elektrickém kontaktu

Measurement of Electric Contact

Roman Chasák

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Kačor, Ph. D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Práce se zabývá měřením na elektrických kontaktech. V první části je definován pojem elektrický kontakt, třídění elektrických kontaktů, materiály, ze kterých se kontakty vyrábí, základní modely kontaktu pro popis dějů na nich se odehrávajících. Dále se teoretická část zabývá problematikami oteplení kontaktů, jejich odolnosti proti svaření a měknutí. Tuto část uzavírá popis $R(U)$ charakteristik kontaktů. V praktické části jsou provedena měření $R(U)$ charakteristik na konkrétní vzorcích několika materiálů. Součástí je také měření rezistivity a napětí měknutí daných vzorků. Konkrétně se jedná o vzorky mědi, hliníku, mosazi a oceli. K získání výsledků byla použita Ohmova metoda upravená pro měření na kontaktech. Výsledné charakteristiky jsou součástí práce. V závěru práce jsou naměřené hodnoty porovnány s hodnotami tabulkovými z dostupných zdrojů. Povedlo se prokázat, že v rámci zjednodušení lze výše uvedenou metodu použít. Pro získání přesnějších výsledků však bude nutno upravit měřicí soustavu, dle návrhů uvedených v závěrečné diskusi.

Klíčová slova

Elektrický kontakt, měření na elektrických kontaktech, rezistivita, napětí měknutí, napětí svaření, Ohmova metoda, $R(U)$ charakteristika, $U(I)$ charakteristika, oteplení kontaktů, stykový odpor, odpor úžiny, materiály pro výrobu kontaktů.

Abstract

The work deals with measurements on electrical contacts. In the first part, the term electrical contact is defined, the classification of electrical contacts, the materials from which the contacts are made, the basic models of contact for the description of the actions taking place on them. Furthermore, the theoretical part deals with the issues of temperature rise of contacts, their resistance to welding and softening. This section concludes with a description of the $R(U)$ characteristics of the contacts. In the practical part, measurements of $R(U)$ characteristics are performed on specific samples of several materials. It also includes the measurement of resistivity and tension softening of the samples. Specifically, these are samples of copper, aluminum, brass and steel. To obtain the results, the Ohm method adapted for measurements on contacts was used. The resulting characteristics are part of the work. At the end of the work, the measured values are compared with the values of available chart sources. It has been shown that the above method can be used to simplify the process. However, in order to obtain more accurate results, it will be necessary to adjust the measuring system, according to the proposals given in the final discussion.

Keywords

Electric contact,, measurement of electric conatcts, resitivity, softening voltage, melting voltage, Ohm's method, $R(U)$ characteristic, $U(I)$ characteristic, teperature rise of electric contacts, contact resistance, constriction resistance, materials for making contacts

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Petru Kačorovi, Ph. D. za odborné vedení práce trpělivost a ochotu kterou mi v průběhu zpracování věnoval.

Obsah

Abstrakt.....	2
Klíčová slova.....	2
Abstract.....	3
Keywords.....	3
Poděkování.....	4
Seznam použitých zkratk a značek	7
1 Úvod.....	11
2 Elektrické kontakty.....	12
2.1 Definice elektrického kontaktu.....	12
2.2 Typy kontaktů.....	12
2.3 Požadavky na elektrické kontakty	12
3 Materiály pro výrobu elektrických kontaktů.....	14
3.1 Čisté kovy.....	14
3.2 Slitiny na bázi stříbra.....	15
3.3 Slitiny na bázi zlata	15
3.4 Slitiny na bázi mědi.....	16
3.5 Slitiny na bázi platinových kovů	16
3.6 Pseudoslitiny – slinuté hmoty	16
4 Styk kontaktů a jeho model	17
4.1 Úžina	17
4.2 Stykový odpor	17
4.3 Model úžiny a úžinový odpor	17
5 Oteplení kontaktů	21
6 Odolnost kontaktů proti svaření.....	23
6.1 Svaření kontaktů.....	23
6.2 Měknutí kontaktů	25
6.3 R(U) charakteristika kontaktu.....	25
6.4 Měření R(U) charakteristiky	27
7 Měření napětí měknutí a R(U) charakteristik	28
7.1 Kroky měření.....	28
7.2 Seznámení s měřenými materiály	28
7.3 Měření měrného odporu vzorků materiálu.....	29

7.3.1	Ohmova čtyřvodičová metoda měření odporu	29
7.3.2	Postup měření	30
7.3.3	Jednotlivé prvky měřicí soustavy.....	30
7.3.4	Vynesená charakteristika $R(U)$	31
7.3.5	Výpočet rezistivity materiálu	32
7.3.6	Výsledné rezistivity	33
7.4	Měření napětí měknutí.....	33
7.4.1	Úprava vzorků materiálu před měřením.....	34
7.4.2	Ohmova metoda pro měření napětí stykového odporu kontaktů	35
7.4.3	Postup měření	35
7.4.4	Prvky měřicí soustavy.....	36
7.4.5	Specifikum u měření hliníku.....	37
7.4.6	Zaznamenaný časový průběh.....	37
7.4.7	Vynesení $U(I)$ charakteristik a vyhodnocení napětí měknutí pro jednotlivé materiály..	39
7.5	Vynesení $R(U)$ charakteristik	43
7.6	Kontrolní výpočet.....	44
7.6.1	Problém s naměřenou teplotou.....	45
7.7	Porovnání naměřených hodnot s tabulkovými.....	46
8	Závěr	47

Seznam použitých zkratk a značek

Značky:

A	(m^2)	plocha
A_p	(m^2)	ekvipotenciální plocha, značně vzdálená od místa styku kontaktů
A_S	(m^2)	plocha stykové plošky kontaktů
A_k	(m^2)	chladicí povrch
E	(Pa)	modul pružnosti v tahu
F_K	(N)	síla přitlaku kontaktů
I	(A)	elektrický proud
$I_{t\infty}$	(A)	minimální tavný proud
R	(Ω)	odpor
R_o	(m)	poloměr polokulové vrstvy
R_p	(Ω)	přechodový odpor cizích vrstev
R_S	(Ω)	stykový odpor
R_u	(Ω)	úžinový odpor
R_θ	$(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	tepelný odpor
S	(m^2)	průřez
U	(V)	napětí
U_S	(V)	napětí styku kontaktů
U_t	(V)	napětí svaření kontaktů
U_x	(V)	napětí měknutí
$U_K; \Delta U$	(V)	úbytek napětí na kontaktu
X_m		měřicí rozsah
c_{tv}		konstanta tvaru styku kontaktů
d		derivace
d	(m)	průměr
i	(A)	okamžitá hodnota proudu
l	(m)	délka
n		počet kontaktních plošek; počet bitů měřicí karty
r	(m)	poloměr
r_k	(m)	poloměr koule
r_o	(m)	poloměr kruhové úžiny
r_{ot}	(m)	poloměr kruhové úžiny pro teplotu svaření

u	(V)	okamžitá hodnota napětí
Δ		změna
Δ	(různé)	absolutní chyba měření
Φ	(W)	tepelný tok
α	(K ⁻¹)	teplotní odporový činitel
α_0	(W · m ⁻² · K ⁻¹)	součinitel přestupu tepla
δ	(%)	relativní odchylka
ϑ	(K)	teplota
ϑ_s	(K)	teplota v místě styku kontaktů
ϑ_p	(K)	teplota ekvipotenciální plochy značně vzdálené od místa styku kontaktů
λ	(W · K ⁻¹ · m ⁻¹)	měrná tepelná vodivost
λ_t	(W · K ⁻¹ · m ⁻¹)	měrná tepelná vodivost pro teplotu svaření
ϱ	(Ω · m)	rezistivita
ϱ_t	(Ω · m)	rezistivita pro teplotu svaření
ϱ_{20}	(Ω · m)	rezistivita pro teplotu 20 °C
ϱ_0	(Ω · m)	rezistivita pro teplotu 0 °C
σ_{Pd}	(N · m ⁻²)	modul pružnosti v tlaku

Zkratky:

Al	hliník (platí i v indexu)
Cu	měď (platí i v indexu)
CuZn	mosaz (platí i v indexu)
Fe	železo nebo ocel (platí i v indexu)
K	kontakt
Měř.	měřící, změřené
PC	počítač
prům.	aritmetický průměr
ZVN	zvláštní vysoké napětí

Seznam obrázků

Obrázek 1 Znázornění místa styku kontaktů (3, s. 174).....	17
Obrázek 2 Průchod proudu jednou mikroskopickou ploškou kontaktu (1, s. 11).....	17
Obrázek 3 Jiné znázornění modelu úžiny s polem tvaru elipsoidu (1, s. 16)	18
Obrázek 4 Řez modelem úžiny s kulovým polem (3, s. 174)	18
Obrázek 5 Řez modelem úžiny s polem tvaru elipsoidu (3, s. 175).....	18
Obrázek 6 Závislost síly nutné k odtržení kontaktu na průchodu proudu pro dva různé materiály a přítlačné síly (3, s. 187).....	23
Obrázek 7 tři zóny závislosti síly potřebné k odtržení kontaktů na přítlačné síle (3, s. 187)	24
Obrázek 8 Časový průběh vzdálenosti a napětí při odskoku kontaktů (3, s. 189).....	24
Obrázek 9 RU charakteristika kontaktu s vyznačenými částmi průběhu (1, s. 87)	25
Obrázek 10 R(U) charakteristiky pro dva jiné kontaktní materiály, a to čisté zlato a plátovaný nikl (1, s. 87).....	26
Obrázek 11 Schéma zapojení Ohmovy čtyřvodičové metody	29
Obrázek 12 Blokové schéma měření rezistivity vzorků materiálu	30
Obrázek 13 Charakteristika R(U) pro metrové vzorky materiál	31
Obrázek 14 Charakteristika R(U) pro metrové vzorky materiál	33
Obrázek 15 Úprava vzorku rozměry.....	34
Obrázek 16 Vzorky materiálu připravené k měření	34
Obrázek 17 Schéma zapojení Ohmovy metody pro měření stykového odporu.....	35
Obrázek 18 Vzorky materiálu usazené do přípravku pro měření.....	35
Obrázek 19 Blokové schéma měření napětí měknutí.....	36
Obrázek 20 Přípravek doplněný o závaží	37
Obrázek 21 Časový průběh úbytku napětí a proudu změřený na kontaktech pro hliník	38
Obrázek 22 U(I) charakteristika pro mosaz	39
Obrázek 23 U(I) Charakteristika pro hliník	40
Obrázek 24 U(I) charakteristika pro vzorek mědi	41
Obrázek 25 U(I) charakteristika naměřená pro ocel	42
Obrázek 26 Naměřené R(U) Charakteristiky pro zkoumané vzorky materiálu.....	43
Obrázek 27 Teplotní průběh zaznamenaný při měření vzorku hliníku	45

Seznam tabulek

Tabulka 1 Napětí měknutí a tavení některých materiálů (U_x – napětí měknutí; U_t – napětí svaření) (2, s. 195).....	26
Tabulka 2 Výsledný měrný odpor pro jednotlivé vzorky materiálu.....	33
Tabulka 3 Změřené napětí měknutí pro vzorek mosazi	40
Tabulka 4 Změřené napětí měknutí pro hliník.....	41
Tabulka 5 Naměřené napětí měknutí pro měď	41
Tabulka 6 změřené teploty měknutí pro vzorek oceli	42
Tabulka 7 Porovnání naměřených napětí měknutí s tabulkovými	46

1 Úvod

V této práci se budu zabývat elektrickými kontakty, konkrétně měřením na nich. Mým cílem bude provést měření napětí měknutí kontaktů několika vzorků různých materiálů a vynesení příslušné části $R(U)$ charakteristiky daného materiálu. Následně naměřené hodnoty ověřím výpočtem a dostupnými tabulkovými podklady.

2 Elektrické kontakty

Účelem elektrických kontaktů je spojování a rozpojování vodivých částí elektrických obvodů. Bez elektrických kontaktů by se neobešla naprostá většina elektrických zařízení, zejména pak elektrických přístrojů. Elektrické kontakty se vyrábí v nepřeberném množství konstrukčních a technologických provedení. K jejich výrobě je využívána celá řada materiálů.

2.1 Definice elektrického kontaktu

Nejdříve bych rád uvedl definici elektrického kontaktu. R. Holm definuje ve své publikaci elektrický kontakt takto: „*Termín elektrický kontakt znamená rozpojitelné spojení mezi dvěma vodiči umožňující vést elektrický proud.*“ (1, s. 1) . Profesor Butkevič pro změnu definuje elektrický kontakt jako elektrický spoj, jímž se obvody zapínají, vypínají nebo přepínají, elektrický spoj je pak podle jeho definice místo, v němž přechází proud z jedné části obvodu do druhé. (2, s. 183)

2.2 Typy kontaktů

Kontakty můžeme rozdělit na mnoho různých druhů a kategorií podle množství nejrozličnějších kritérií. Jako první bych uvedl rozdělení na pevné a pohyblivé. Pohyblivé kontakty jsou určeny k vypínání, zapínání a přepínání, pevné slouží k připojení nebo odpojení jen občasnému, ve stavu, kdy vodivou drahou neprochází proud. V mojí práci se však budu zabývat pouze kontakty pohyblivými. Kontakty lze též rozdělit dle hladiny napětí a velikostí proudů, pro které jsou využitelné, od mikro kontaktů v elektronice, kterými se v této práci zabývat nebudu po kontakty velkých rozměrů pro použití v přístrojích pro napěťovou hladinu ZVN. Dalším možným dělením elektrických kontaktů je podle četnosti užití. Je jasné, že jinak často spínají kontakty vypínače veřejného osvětlení (v jednotkách za den) a kontakty stykače, který ovládá motor nějakého zařízení v továrně a spíná např. 500krát za hodinu. Další možné dělení je podle skupenství materiálu kontaktu (pevné x kapalné). Tato práce se bude zabývat pouze kontakty z pevných materiálů.

2.3 Požadavky na elektrické kontakty

Kontakty jsou jedny z nejexponovanějších částí elektrických přístrojů, proto jsou na ně kladeny vysoké nároky. Základní požadavky na elektrické kontakty jsou:

- a) malý stykový odpor
- b) velká mechanická odolnost
- c) velká odolnost proti svaření
- d) velká odolnost proti opalování elektrickým obloukem
- e) pozitivní účinek při deionizačních procesech při zhašení oblouku

(3)

Tyto požadavky můžeme naplnit volbou vhodného konstrukčního provedení, správným předpokladem vlivů působících na kontakt, a především volbou vhodných materiálů pro výrobu kontaktu.

3 Materiály pro výrobu elektrických kontaktů

Jak jsem již uvedl výše, pro tato práce se zabývá pouze kontakty z pevných materiálů. Pro výběr vhodného materiálu musíme brát v potaz jeho mechanické vlastnosti, zejména odolnost proti otěru a tlaku, jeho elektrickou a tepelnou vodivost, teplotu tání, vznik nežádoucích vrstev při různých teplotách a vlivech prostředí, ve kterém bude kontakt užíván. Dále pak náročnost technologie získání, výroby a zpracování použitého materiálu. Jedním z výrazných faktorů je též jeho cena.

Pro výrobu elektrických kontaktů se používají nejčastěji čisté kovy, kovové slitiny, nebo kovové směsi tvořené práškovou metalurgií.

3.1 Čisté kovy

Stříbro Ag

Stříbro je nejdůležitějším kovem pro elektrické kontakty, má vynikající tepelnou i elektrickou vodivost, velkou odolnost proti vlivům atmosférického kyslíku. Jeho hlavními nevýhodami jsou:

- snadný otěr
- nízká teplota tavení
- malá mechanická pevnost
- vznik odolných nežádoucích vrstev v prostředí s působením síry

Zlato Au

Zlato je nejušlechtilější kov, má opět velmi dobrou tepelnou i elektrickou vodivost, je odolné vůči oxidaci a tvorbě nežádoucích vrstev. Nevýhody:

- nízká odolnost otěru
- nízká teplota tání

Měď Cu

Měď není svými vlastnostmi dobrý kontaktní materiál, používá se na levné kontakty.

Platina Pt

Platina má vysokou chemickou odolnost, má dobré mechanické vlastnosti, je otěruvzdorná, má též vysokou teplotu tání. Hlavními nevýhodami jsou vysoká cena a nižší tepelná a elektrická vodivost.

Paládium Pd

Má podobné vlastnosti jako platina, jen v rozmezí 800–900 °C tvoří oxidové vrstvy. Používá se v kontaktech pro relé.

Wolfram W a Molybden Mo

Mají vysokou teplotu měknutí a tání, mají velkou mechanickou odolnost, jejich nevýhodou je technologická náročnost výroby. Vyrábějí se obvykle práškovou metalurgií. Jejich využití je převážně jako kontakty pro spínání vysokého napětí.

Grafit C

Používá se pro kluzné kontakty, což je mimo téma této práce.

3.2 Slitiny na bázi stříbra

Jemnozrnné stříbro Ag Ni_{0,1}

Příměsí niklu do stříbra se zhorší elektrické a tepelné vlastnosti,lepší se však chemická odolnost a vlastnosti mechanické. Používá se pro kontakty vypínačů středních výkonů.

Tvrdé stříbro Ag-Cu

Zlepší se mechanické vlastnosti stříbra, zhorší se chemická odolnost. Používá se pro spínání malých výkonů.

Ag-CdO

Zhorší se oproti stříbru elektrická a tepelná vodivost. Mají vyšší teplotu tání a měknutí, lépe odolávají opalu obloukem a mají velmi dobré vlastnosti pro zhašení oblouku. Používají se jako hlavní kontakty stykačů do 630 A malých jističů do 25 A.

Ag-C

Tyto kontakty jsou mimořádně odolné proti svaření, mají vysokou vodivost používají se nejčastěji v páru s kontaktem stříbrným. Nevýhodou je větší eroze elektrickým působením. Vhodné jako klidové kontakty.

3.3 Slitiny na bázi zlata

Slitiny na bázi zlata se využívají především jako mikrokontakty v elektronice, což je mimo rozsah této práce.

3.4 Slitiny na bázi mědi

Slitiny na bázi mědi se používají pro pružné lamely kontaktů, nebo pro dvojkovové kontakty.

3.5 Slitiny na bázi platinových kovů

Tyto slitiny jsou nejdražší kontaktní materiál a používají se tam, kde je potřeba zvláště nízký přechodový odpor a dobrá odolnost proti opalu. Nejpoužívanější z nich jsou Pt-Ir, Pt-Ag a Pt-Cu

3.6 Pseudoslitiny – slinuté hmoty

Mají vysokou tvrdost, odolnost proti opalu obloukem, dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Vyrábějí se zejména práškovou metalurgií

W-Cu

Používají se pro kontakty v oleji pro proudy do 100 A, při napětí 110–550 V s velkými mechanickými rázy nebo tlaky.

W-Ag

Vhodné pro kontakty na vzduchu s vysokou četností spínání, dobrá odolnost proti svaření. Často se používají v elektrické trakci.

Ni-Ag

Používají se na vzduchu při nižších napětích, a i vyšších proudech.

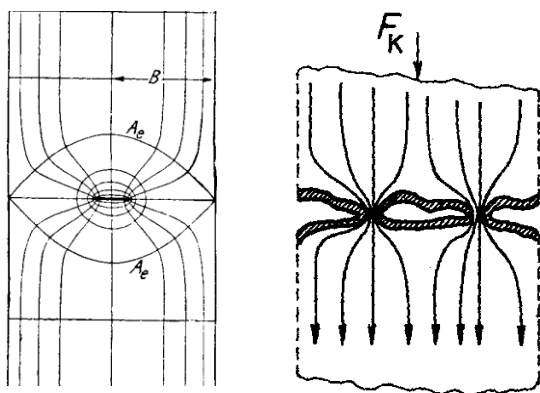
(4, s. 113-117)

4 Styk kontaktů a jeho model

Jelikož je reálný styk kontaktů velice složitá a komplexní záležitost, pro kterou by matematický popis průběhů fyzikálních veličin nebyl reálný, musíme zavést zjednodušený model styku kontaktů, který jsme schopni popsat matematicky. U styku kontaktů nás zajímá převážně jeho odpor, proto se jím budeme detailněji zabývat.

4.1 Úžina

Místo styku kontaktů nazýváme úžina. Jelikož žádný kontakt není dokonale hladký, nedotýká se druhého kontaktu celou styčnou plochou, ale velkým počtem mikroskopických plošek. Počet plošek tvořící proudovou úžinu je náhodný a závisí na mechanických vlastnostech materiálu, přitlačné síle F_K a nečistotách na povrchu kontaktu. Tato vlastnost styku kontaktů způsobuje deformaci proudnic, mění jejich rozložení, deformuje jejich tvar a zmenšuje průřez, kterým proud tekoucí skrz kontakt prochází, jak je možno vidět na obrázcích **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, z čehož vyplývá, že úžina má svůj odpor R_u . (3, s. 173 -174)



Obrázek 2 Průchod proudu jednou mikroskopickou ploškou kontaktu (1, s. 11)
Obrázek 1 Znárodnění místa styku kontaktů (3, s. 174)

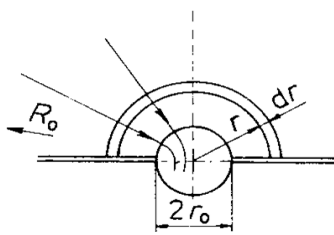
4.2 Stykový odpor

Každé místo styku kontaktů má svůj odpor ten se značí R_s a skládá se z odporu úžiny a odporu cizích vrstev. Odpor cizích vrstev závisí převážně na volbě materiálu, přitlačné síle a okolním prostředí, velikost úžinového odporu probereme v textu dále. (3, s. 174)

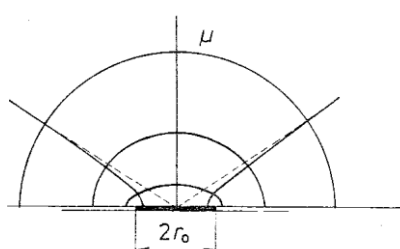
$$(1) \quad R_S = R_u + R_P$$

4.3 Model úžiny a úžinový odpor

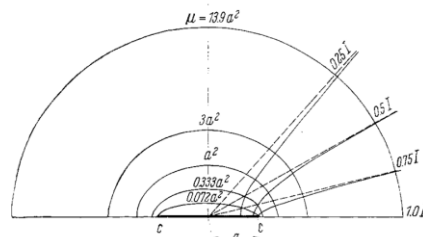
Pro styk kontaktů lze pracovat nejnázorněji se dvěma modely úžiny, a to s kulovým elektrickým polem (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) nebo s polem tvaru elipsoidu. Pro jednoduchost budeme pracovat se dvěma modely úžiny modelem s kulovým polem, který je jednodušší a modelem s elektrickým polem tvaru elipsoidu, který lépe odpovídá realitě.



Obrázek 4 Řez modelem úžiny s kulovým polem (3, s. 174)



Obrázek 5 Řez modelem úžiny s polem tvaru elipsoidu (3, s. 175)



Obrázek 3 Jiné znázornění modelu úžiny s polem tvaru elipsoidu (1, s. 16)

Model úžiny je tvořen 2 kontakty s rovinným stykem, které se stýkají v kruhové plošce s poloměrem r_0 a proudové pole v poloprostorech obou kontaktů má tvar koule. Odvodíme jeho odpor:

Odpor polokulové skořepiny s poloměrem r a tloušťkou dr :

$$(2) \quad dR_u = \frac{\varrho}{2\pi r^2} dr$$

Kde ϱ je rezistivita materiálu. Potom je odpor polokulové skořepiny dané r_0 a libovolným poloměrem R_0 :

$$(3) \quad R_{u1} = \frac{\varrho}{2\pi} \int_{r_0}^{R_0} \frac{dr}{r^2} = \frac{\varrho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R_0} \right)$$

Většinová část odporu je soustředěna v blízkosti styku. Pro $R_0 > 10 r_0$ již nemá jeho změna téměř žádný vliv na velikost úžinového odporu, a proto počítáme, že R_0 se blíží k nekonečnu. Vyjde nám vzorec:

$$(4) \quad R_{u1} = \frac{\varrho}{2\pi r_0}$$

Jelikož je námi hledané pole kulové a vzorec odpovídá poli polokulovému bude celkový odpor úžiny:

$$(5) \quad R_u = \frac{\varrho}{\pi r_0}$$

Tento odpor je menší než skutečný díky rozdílnosti kulového proudového pole od skutečného. Kvůli větší věrohodnosti přejdeme od pole kulového k poli tvaru elipsoidu. To se blíží tvarem skutečnému mnohem více. Jeho odvození vychází z rovnice elipsoidu:

$$(6) \quad \frac{x^2}{a^2 + \mu} + \frac{y^2}{b^2 + \mu} + \frac{z^2}{\mu} = 1$$

a přesahuje rozsah této práce, proto si uvedeme pouze výsledné vzorce pro odpor úžiny:

$$(7) \quad R_u = \frac{\varrho}{2r_0}$$

Pokud jsou kontakty z různých materiálů, tak:

$$(8) \quad R_u = \frac{\varrho_1 + \varrho_2}{4r_0}$$

Tvoří-li styk n stykových plošek, pak:

$$(9) \quad R_{un} = \frac{\varrho}{2nr_0}$$

Velikost stykových plošek závisí na přitlačné síle F_K , typu deformace, tvaru kontaktu a materiálu kontaktu. Známe několik základních stykových geometrických uspořádání:

- a) bodový styk (vzájemně se dotýkají dva kulové povrchy, koule s rovinou, koule s plochou, nebo dva válce do kříže)
- b) přímkový styk (dotýkají-li se válec nebo kužel podél površky s rovinou)
- c) plošný styk (styk 2 rovinnými plochami)

Zde uvedeme základní vzorce pro odpor úžiny dvou kontaktů stejného materiálu při pružné deformaci tvaru dvou koulí (11) a koule proti rovině (10):

$$(10) \quad R_{un} = \frac{\varrho}{2,22 \sqrt[3]{\frac{F_K r_k n^2}{E}}}$$

$$(11) \quad R_{un} = \frac{\varrho}{1,8 \sqrt[3]{\frac{F_K r_k n^2}{E}}}$$

Kde ϱ je rezistivita materiálu, F_K přitlačná síla, r_k poloměr koule(i), n počet styčných plošek a E je modul pružnosti v tahu.

Pro deformaci trvalou je pak vzorec pro úžinový odpor:

$$(12) \quad R_{\text{un}} = \frac{\varrho(\pi\sigma_{\text{Pd}})^{\frac{1}{2}}}{2 \cdot n^{\frac{1}{2}} \cdot F_{\text{K}}^{\frac{1}{2}}}$$

Kde σ_{Pd} je modul pružnosti v tlaku a ostatní veličiny mají stejný význam jako ve vzorcích (10) a (11). Úžinové odpory vypočtené neodpovídají úplně přesně úžinovým odporům zjištěným experimentálně, jelikož se jedná o problematiku velmi složitou a uvedené výpočty jsou značně zjednodušené.

(3, s. 173 - 177)

5 Oteplení kontaktů

Pro pochopení problematiky měknutí a následného svaření kontaktů, kterou se budeme zabývat detailně později, potřebujeme znát průběh a distribuci tepla v elektrických kontaktech. Průchodem proudu přes místo styku kontaktů vzniká teplo, které je dáno stykovým odporem, toto teplo způsobuje oteplení kontaktů, jelikož však stykový odpor není rozložen rovnoměrně po kontaktu, není ani jeho oteplení rovnoměrné ve všech místech. Pro výpočty použijeme model kontaktu tvaru elipsoidu. Počítejme s tím, že v úžině bude stejné proudové a tepelné pole. Též má tato modelová úžina konstantní rezistivitu a součinitel tepelné vodivosti nezávislé na teplotě.

Máme-li ekvipotenciální plochu A_p , značně vzdálenou od místa styku kontaktů, pak napětí mezi ní a místem styku bude poloviční proti napětí stykovému U_s . Pak:

$$(13) \quad \Delta A = A_s - A_p \simeq \frac{U_s}{2}$$

$$(14) \quad \Delta \vartheta = \vartheta_s - \vartheta_p$$

V úžině je proudové a tepelné pole totožné, takže musí platit tahle podmínka:

$$(15) \quad \frac{R_\vartheta}{R} = \frac{\frac{1}{\lambda} \frac{l}{S}}{\frac{\rho}{\lambda} \frac{l}{S}}$$

$$(16) \quad R_\vartheta = \frac{R}{\lambda \rho}$$

R_ϑ je tepelný, R elektrický odpor zadaného prostoru. Rovnice platí i v diferenciálním tvaru:

$$(17) \quad dR_\vartheta = \frac{1}{\lambda \rho} dR = \frac{1}{\lambda \rho} \frac{du}{i}$$

Dalším předpokladem je, že teplo se odvádí pouze kontaktem, a to z důvodu platnosti rovnosti tepelného a proudového pole. Potom je tepelný spád na jednom elementu kdekoliv v kontaktu roven ztrátám, které procházejí odporem a odporem samotným. Proto platí:

$$(18) \quad d\vartheta_x = \Phi_x dR_\vartheta$$

Kde Φ_x je tepelný tok rovný ztrátám. Dále do rovnice (18) dosadíme $\Phi_x = u_x i$.

$$(19) \quad d\vartheta_x = \frac{u_x i}{\lambda \rho} du_x = \frac{u_x}{\lambda \rho} du_x$$

Oteplení styku kontaktů proti libovolné hladině úžiny, která má proti styku úbytek napětí U_x je:

$$(20) \quad \int_{\vartheta_x}^{\vartheta_s} d\vartheta_x = \frac{1}{\lambda \varrho} \int_0^{U_x} u_x du_x = \frac{U_x^2}{2\lambda \varrho}$$

Z toho plyne, že oteplení místa styku proti místu kontaktu, které je velmi vzdálené, je:

$$(21) \quad \vartheta_s - \vartheta_p = \frac{U_s^2}{8\lambda \varrho}$$

Kde ϑ_p je teplota v místě, kde už nedochází k oteplení vlivem stykového odporu, ale pouze průchodem proudu. Velikost této teploty najdeme pomocí:

$$(22) \quad \vartheta_p - \vartheta_o = \frac{RI^2}{\alpha_o A_k}$$

I je zde proud, který kontaktem prochází, α_o je součinitel přestupu tepla, A_k je povrch, kterým se kontakt chladí a ϑ_o je teplota okolí. Teplota místa styku je pak:

$$(23) \quad \vartheta_s = \frac{U_s^2}{8\lambda \varrho} + \frac{RI^2}{\alpha_o A_k} + \vartheta_o$$

(3, s. 184 -186)

6 Odolnost kontaktů proti svaření

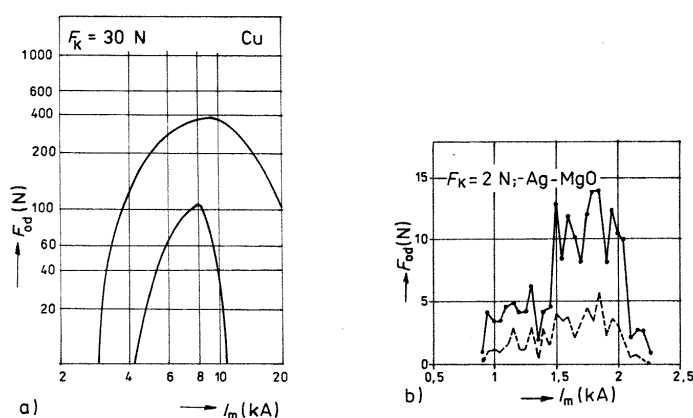
V této práci se budu zabývat podrobněji odolností elektrických kontaktů proti svaření. Svaření kontaktů je velmi nežádoucí jev, jelikož při něm dochází k znemožnění rozpojení kontaktů přirozeným způsobem, dochází ke zničení kontaktů, mnohdy přístroje samotného, a pokud nemá přístroj sekundární možnost vypnutí (např. pojistky sériově zapojené s kontakty), dochází k jeho selhání. Svaření je nejhorší možný stav poškození kontaktů. Nežádoucí jsou však i stavy jemu předcházející, kdy dochází k měknutí kontaktu, jeho deformaci teplem a přitlačnou silou, též jejich lepení nebo částečné svaření kontaktů, tyto nežádoucí stavy budou v této kapitole zahrnuty.

6.1 Svaření kontaktů

Profesor Butkevič uvádí ke svaření kontaktů toto: „Prochází-li přes kontakty velký proud (např. zkratový), zvětší se úbytek napětí na nich natolik, že teplota v místě styku dosáhne nebo dokonce převýší teplotu, při níž nastává tavení materiálu kontaktů. Prochází-li proud dostatečnou dobu, dojde pak ke svaření kontaktu.“ (2, s. 195) R. Holm pak definuje svaření takto: *Teplota svaření je horní hranicí, kdy je kontakt ještě celý pevného skupenství, napětí odpovídající této teplotě nazýváme napětí svaření. Výsledkem každého pokusu o překročení napětí na kontaktech přes hodnotu napětí svaření je vnoření zkapalněných částí kontaktů do sebe.* (1, s. 89)

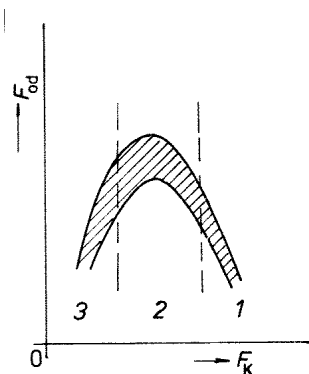
Ke svaření může dojít dvěma způsoby, a to svaření v statickém režimu a svaření v režimu dynamickém.

Svaření ve statickém režimu je způsobeno průchodem příliš velkého (zkratového) proudu, na který kontakt není dimenzován. U svaření při statickém svaru je pevnost svaru, čímž zároveň i jeho fatálnost, velmi ovlivněna přitlačnou silou kontaktů, zároveň je síla potřebná k odtržení kontaktů od sebe přímo úměrná ploše svaru. Pokud síla potřebná k odtržení překročí sílu kontaktního ústrojí, stává se svaření obrovským problémem. Příklad závislosti této síly na průchozím proudu můžete vidět na obrázku níže:



Obrázek 6 Závislost síly nutné k odtržení kontaktu na průchodu proudu pro dva různé materiály a přitlačné síly (3, s. 187)

Závislost síly potřebné k odtržení svaru na síle přitlačné lze rozdělit na tři oblasti, jak je možno vidět na obrázku:

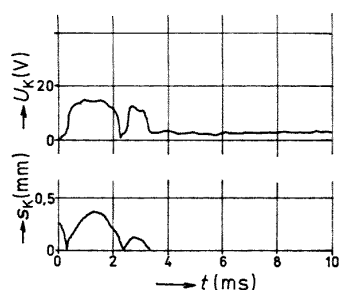


Obrázek 7 tři zóny závislosti síly potřebné k odtržení kontaktů na přitlačné síle (3, s. 187)

V první oblasti vznikají studené svary, při nichž se úbytek napětí na stykovém odporu pohybuje v oblasti měknutí materiálu. Druhá oblast je charakteristická vznikem svarů následkem tavení materiálů úbytek napětí odpovídá napětí tavení. Třetí oblast pak je dána stavem, kdy už v místě styku vznikají páry, které spolu s termodynamickými silami oddalují kontakty od sebe a dochází k výstřiku materiálu z kontaktního prostoru a zapálení oblouku, což vše vede ke snížení pevnosti daného svaru. (3, s. 187)

Svaření kontaktů v dynamickém režimu je pak způsobeno tím, že při zapínání kontaktů nastane po prvním dotyku odraz, který se může několikrát opakovat, při kmitání se pokaždé zapálí a zhasne elektrický oblouk, čímž se kontakt hodně zahřívá. Kmitání kontaktů při sepnutí je způsobeno jednak pružností kontaktů samých, jednak pružností celé kontaktní soustavy. Proto je odskok kontaktů velice nežádoucí! (3, s. 188)

Časový průběh napětí a vzdálenosti kontaktů při odrazech během zapínání jsou zobrazeny na obrázku



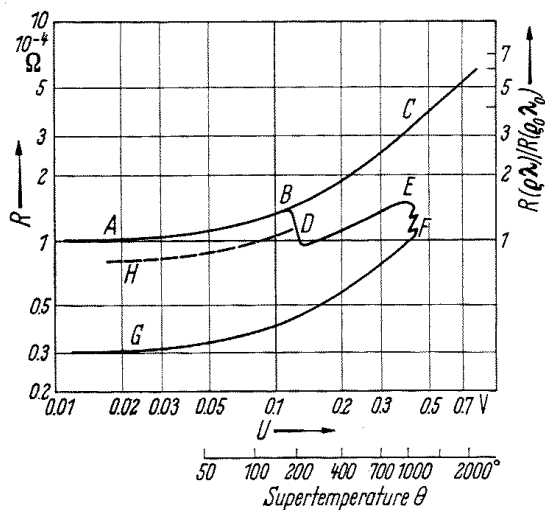
Obrázek 8 Časový průběh vzdálenosti a napětí při odskoku kontaktů (3, s. 189)

6.2 Měknutí kontaktů

Dalším důležitým pojmem této kapitoly je měknutí kontaktů. Jde o nežádoucí stav předcházející svaření kontaktů. Docent Doubravec popisuje tento jev takto: „S rostoucím úbytkem napětí na styku kontaktů se mění stykový odpor, z počátku jen z důvodu změny rezistivity materiálu kontaktů s teplotou. Když teplota v místě styku dosáhne hodnoty, při které začíná materiál měknout, dojde vlivem přitlaku k náhlému zvětšení stykové plochy, což se projeví náhlým zmenšením odporu. Napětí, při němž dochází k tomuto jevu, nazýváme napětím měknutí.“ (3, s. 186)

6.3 R(U) charakteristika kontaktu

R(U) charakteristika kontaktu je základní charakteristikou pro vyhodnocování odolnosti kontaktů proti měknutí a svaření. Tato charakteristika vyjadřuje závislost odporu na úbytku napětí na stykovém odporu kontaktů. Charakteristika je závislá na teplotě okolí, materiálu kontaktů a procházejícím proudu, přitlačné síle a prostředí, ve kterém se kontakt vyskytuje. Zde na obrázku (Obrázek 9) vidíme její příklad pro kontakty z čisté mědi, při teplotě 293 K (19,85° C) a přitlačné síle 10 N.



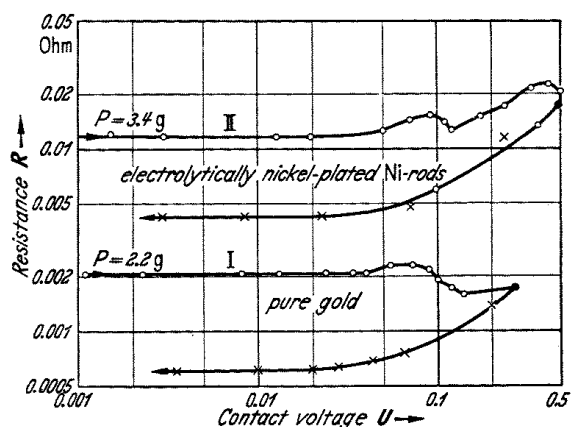
Obrázek 9 RU charakteristika kontaktu s vyznačenými částmi průběhu (1, s. 87)

Osa Y, na které je zobrazen odpor kontaktu, bývá zpravidla logaritmická a je tomu tak i zde. Na hlavní ose X je zobrazen úbytek napětí na stykovém odporu kontaktů, na vedlejší ose X pak teplota kontaktů v místě styku. Nyní se detailněji podívejme na průběh samotný. Kontakty prochází proud přes stykový odpor, tím se zvyšuje úbytek napětí na tomto odporu. Oteplením tohoto odporu jeho hodnota stoupá dle Franz-Wiedemanova zákona, což vidíme v naší charakteristice jako křivku A–B–C. Nicméně reálnou charakteristikou pro kontakt je křivka A–B–D–E–F–G. Položme si nyní otázku, proč je tomu tak? V bodě B dochází ke zlomu, protože teplota způsobená úbytkem napětí dosáhne bodu, kdy materiál kontaktů začne měknout a tím, jak na ně působí přítlačná síla se zvětší plocha styku kontaktů a odpor prudce klesne, vidíme mezi body B-D, pak teplota opět stoupá mezi body D-E podle Franz-Wiedemanova zákona. V bodě E však opět nastává zlom. To, když kontakty začnou vlivem tepla přecházet z tuhého skupenství do skupenství kapalného, čímž se svaří. Děj svaření můžeme v charakteristice vidět mezi body E-F, poté jsou již kontakty svařeny a chovají se jako jednolitý kontakt, odpor klesá. Klesá též úbytek napětí na styku kontaktů. Napětí v bodě B na stykovém odporu kontaktů označujeme jako **napětí měknutí** a teplotu v místě styku jako **teplotu měknutí**, napětí a teplotu v bodě E značíme jako **teplotu svaření** kontaktů a **napětí svaření** kontaktů. Níže můžete vidět R(U) charakteristiky některých dalších materiálů.

Napětí měknutí a svaření kontaktů některých základních materiálů můžete vidět v tabulce:

Materiál	Napětí U_x [V]	Napětí U_t [V]
stříbro	0,09	0,37
měď	0,12	0,43
nikl	0,22	0,65
platina	0,25	0,65
wolfram	0,40	1,10

Tabulka 1 Napětí měknutí a tavení některých materiálů (U_x – napětí měknutí; U_t – napětí svaření) (2, s. 195)



Obrázek 10 R(U) charakteristiky pro dva jiné kontaktní materiály, a to čisté zlato a plátovaný nikl (1, s. 87)

6.4 Měření R(U) charakteristiky

R(U) Charakteristiku obvykle měříme za pomoci proudového rázu trvajícího okolo 2 – 10 s, potřebný proud pro dosažení dostatečného úbytku napětí lze velmi zjednodušeně vypočítat podle profesora Butkeviče:

Zanedbáme-li odporový teplotní činitel

$$(24) \quad \frac{U_K^2}{8\rho\lambda} = \vartheta$$

$$(25) \quad R_u = \frac{\rho}{2r_0}$$

Kde ρ je rezistivita materiálu, λ tepelná vodivost kontaktů materiálu, r_0 poloměr stykových ploch a U_K úbytek napětí na kontaktu a R_u odpor úžiny kontaktu.

Pak z těchto rovnic nalezneme minimální proud, při kterém se materiál začíná tavit (úbytek napětí na stykovém odporu se blíží napětí měknutí):

$$(26) \quad I_{t\infty} = r_{ot} \sqrt{\frac{32\lambda_t \vartheta_p}{\rho_t}}$$

Veličiny s indexem t musíme dosadit pro teplotu tavení, rozměry místa styku bereme o 50 % větší než při teplotě normální. Proud získaný tímto výpočtem je opravdu minimální, proto je třeba počít proud vyšší. (2, s. 195 -196)

Potřebný proud lze pro realizovatelnost měření snížit ohřátím daného materiálu vnějším zdrojem tepla a poté výsledné hodnoty přepočítat.

7 Měření napětí měknutí a R(U) charakteristik

7.1 Kroky měření

1. měření 1 m tyčí pro zjištění měrného odporu daného materiálu
2. měření napětí měknutí pro daný materiál
3. vynesení R(U) charakteristik
4. kontrolní výpočet
5. porovnání změřených, vypočtených a tabulkových hodnot

V této práci budu dále postupovat podle jednotlivých kroků výše, způsobem takovým, že vždy nejdříve uvedu teoretický popis metody kroku a hned poté zde zapracuji přímo reálné provedení.

7.2 Seznámení s měřenými materiály

Ideální by samozřejmě bylo měřit některý z často používaných kontaktních materiálů, ale sehnat vzorky, průmyslových kontaktních materiálů v přesně předepsaných rozměrech a žádaného tvaru by byl obrovský problém. Proto v této práci budu měřit materiály používané na výrobu kontaktů jen okrajově a to měď, hliník, mosaz a ocel konkrétně:

Měď – Cu-ETP/CW004A (Cu 99,9 %)

$$\varrho_{20} = 17,24 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m - 17,54 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m \quad (5)$$

$$\lambda = 385 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot m^{-1} \quad (5)$$

Hliník – EN AW-2030 T3 (AlCu4PbMg)

$$\varrho_{20} \rho_{20} = 18,87 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m - 20,41 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m \quad (6)$$

$$\lambda = 140 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot m^{-1} \quad (6)$$

Mosaz – CW614N-R500-A (CuZn39Pb3)

$$\varrho_{20} = 61,58 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m \quad (7)$$

$$\lambda = 123 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot m^{-1} \quad (7)$$

Ocel – S235JR – ČSN 11375 (Fe 97 %, C 0,17 %, Cu 0,55%, Mn 1,4 %)

$$\varrho_{20} = 200 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m - 250 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m \quad (8)$$

$$\lambda = 40 - 45 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot m^{-1} \quad (8)$$

7.3 Měření měrného odporu vzorků materiálu

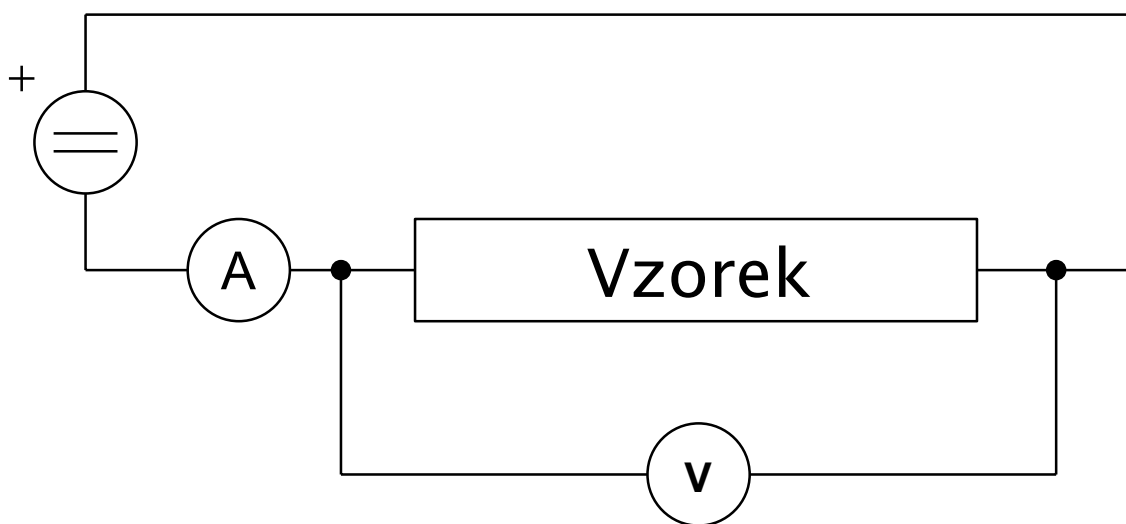
Pro zodpovězení otázky, zda rezistivita námi zkoušených materiálů odpovídá tabulkovým hodnotám, či její případné upřesnění v případě, že je v tabulce ne jedna hodnota, ale rozpětí, jsme se rozhodli ověřit ji v rámci této práce měřením. V době měření jsme ještě neměli k dispozici vzorek oceli, tudíž jsme měřením ověřovali pouze rezistivitu mědi, hliníku a mosazi. Pro měření jsme si vybrali nejjednodušší metodu měření odporu, a to metodu Ohmovu.

7.3.1 Ohmova čtyřvodičová metoda měření odporu

Jak jsme již zmínili výše, jedná se o nejjednodušší metodu měření odporu. Princip této metody je následovný: Vzorek materiálu, u kterého chceme změřit odpor, připojíme ke zdroji stejnosměrného proudu tak, aby se uzavřel obvod. Sériově k měřenému vzorku zapojíme ampérmetr, paralelně ke vzorku pak voltmetr. Z naměřeného proudu a úbytku napětí na vzorku pak snadno vypočteme odpor podle Ohmova zákona konkrétně:

$$(27) \quad R = \frac{U}{I}$$

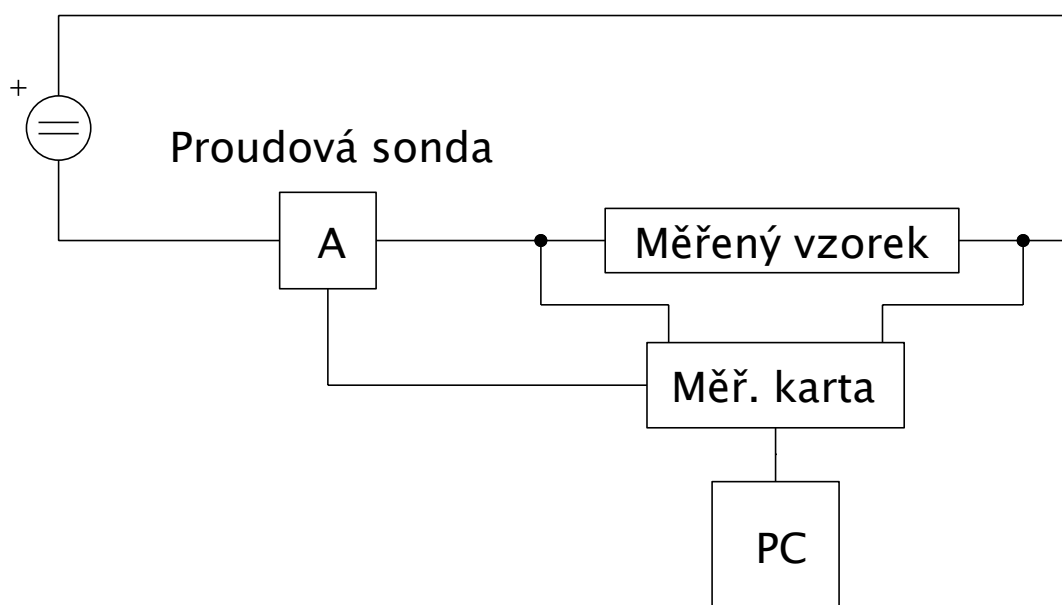
Schéma zapojení této metody můžete vidět na obrázku níže.



Obrázek 11 Schéma zapojení Ohmovy čtyřvodičové metody

7.3.2 Postup měření

Měření provedeme následovně: Nejdříve zapojíme měření dle schématu Ohmovy metody s tím specifikem, že u nás ampérmetr i voltmetr zastane digitální měřicí karta připojená k PC. Proud bude karta snímat bezkontaktní proudovou sondou. Následně budeme na stejnosměrném zdroji přidávat proud od 0 do 40 A, vždy po 5 A s krátkou pauzou, aby proud narůstal schodovitě. Průběh napětí a proudu zaznamenáváme a posléze z nich vyloučením času a automatickým výpočtem okamžitého odporu materiálu, vyneseme $R(U)$ charakteristiku pro jednotlivé vzorky. Blokové schéma tohoto měření můžete vidět na obrázku (Obrázek 12) níže.



Obrázek 12 Blokové schéma měření rezistivity vzorků materiálu

7.3.3 Jednotlivé prvky měřicí soustavy

Měřicí karta

K měření napětí a proudu jsme použili 16bitovou, čtyř kanálovou měřicí kartu NI-9215 od firmy National Instruments. Měřicí rozsah této karty je ± 10 V čili celkem 20 V. Chybu této karty pak určíme následovně:

$$(28) \quad \Delta = \frac{X_m}{2^n} = \frac{20}{2^{16}} = 305,2 \cdot 10^{-6} \text{ V} = 305,2 \text{ } \mu\text{V}$$

Tato chyba měření je pro naše měření dostatečně malá, aby příliš neovlivňovala výsledky měření, proto ji nebudeme v dalším měření uvažovat.

Proudová bezkontaktní sonda

Použitá klešťová sonda pro měření proudu je sonda E3N od firmy Chauvin Arnoux. Jedná se o sondu, která měří proud na principu Hallova jevu.

Zdroj stejnosměrného proudu

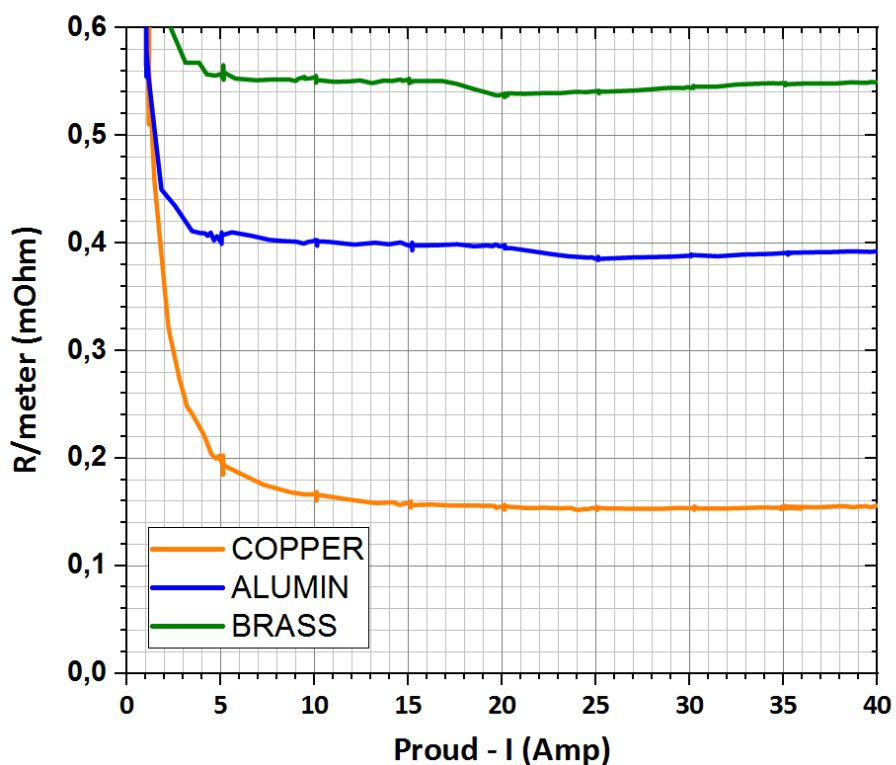
Jedná se o stabilizovaný laboratorní zdroj MN 40 V– 40 A od firmy Mesit.

Měřený vzorek

Měřeným vzorkem jsou nám tyče výše uvedených materiálů délky 1 m a průměru 12 mm.

7.3.4 Vynesená charakteristika $R(U)$

Software v PC, do kterého je připojená měřicí karta nám po správném nastavení vynese $R(U)$ charakteristiku daného vzorku vzhledem k tomu, že je délka vzorku 1 m je odpor ve vynesené charakteristice vztažen k 1 m nikoliv však odpor měrný, ale odpor tyče o délce 1 m a průřezem tyče nikoliv k 1 m^2 .



Obrázek 13 Charakteristika $R(U)$ pro metrové vzorky materiál

V charakteristice můžeme vidět závislost odporu materiálu na proudu. Oranžovou barvu má charakteristika pro měď, modrá pro hliník a zelená pro mosaz. Jak můžeme vidět, odpor nejdříve prudce klesá od nuly proudu a poté se stabilizuje v téměř přímku. Též můžeme usoudit, že jelikož je charakteristika od 10 A celkem stabilní, jsou tyče dostatečně velké a stíhají se uchladiť. Proto se neuplatní změna odporu v závislosti na teplotě natolik, aby to nežádoucím způsobem ovlivnilo naše další výpočty a můžeme výsledný odpor tyče brát jako průměrnou hodnotu odečtenou od 10 A dále. Odporů jednotlivých vzorků jsou následovné.

$$R_{\text{Cu}} = 153 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$R_{\text{Al}} = 400 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$R_{\text{CuZn}} = 540 \cdot 10^{-6} \Omega$$

7.3.5 Výpočet rezistivity materiálu

Nejdříve musíme vypočítat průřez tyčí:

$$(29) \quad S = \frac{d^2}{4} \pi = \frac{(12 \cdot 10^{-3})^2}{4} \pi = 113,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Nyní jednotlivé odpory vynásobíme průřezem tyčí, čímž získáme jednotlivé měrné odpory, které zrovna porovnáme s tabulkovými hodnotami.

Měď

$$(30) \quad \varrho_{\text{Cu}} = R_{\text{Cu}} \cdot S = 153 \cdot 10^{-6} \cdot 113,1 \cdot 10^{-6} = 17,30 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

Porovnání s hodnotami z tabulky:

$$17,24 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} < 17,30 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} < 17,54 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

Z čehož vyplývá, že naše změřená hodnota odpovídá realitě.

Hliník

$$(31) \quad \varrho_{\text{Al}} = R_{\text{Al}} \cdot S = 400 \cdot 10^{-6} \cdot 113,1 \cdot 10^{-6} = 45,24 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

$$18,87 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} < 45,24 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} > 20,41 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

Vidíme, že naměřená hodnota neodpovídá hodnotě tabulkové, což však není zase takový problém, jelikož na povrchu hliníku vzniká již za běžných atmosférických podmínek oxid hlinitý Al_2O_3 , a to ve vrstvě až 2 nm (3, s. 179). Oxid hlinitý je izolant (jeho rezistivita je: $1012 \Omega \cdot \text{m}$ (9)), tudíž může ovlivnit naměřenou rezistivitu značně. Dalšími možnými faktory mohou být mastnota či jiné nečistoty na povrchu tyče. Z toho plyne, že naše naměřená hodnota odpovídá realitě více než hodnota tabulková.

Mosaz

$$(32) \quad \rho_{\text{CuZn}} = R_{\text{CuZn}} \cdot S = 540 \cdot 10^{-6} \cdot 113,1 \cdot 10^{-6} = 61,07 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$
$$61,58 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} \cong 61,07 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

Což znamená, že měření je správné.

Ocel

Pro ocel nemáme hodnotu naměřenou, proto použijeme hodnotu uprostřed mezi hodnotami tabulkovými.

$$\rho_{\text{Fe}} = 225 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

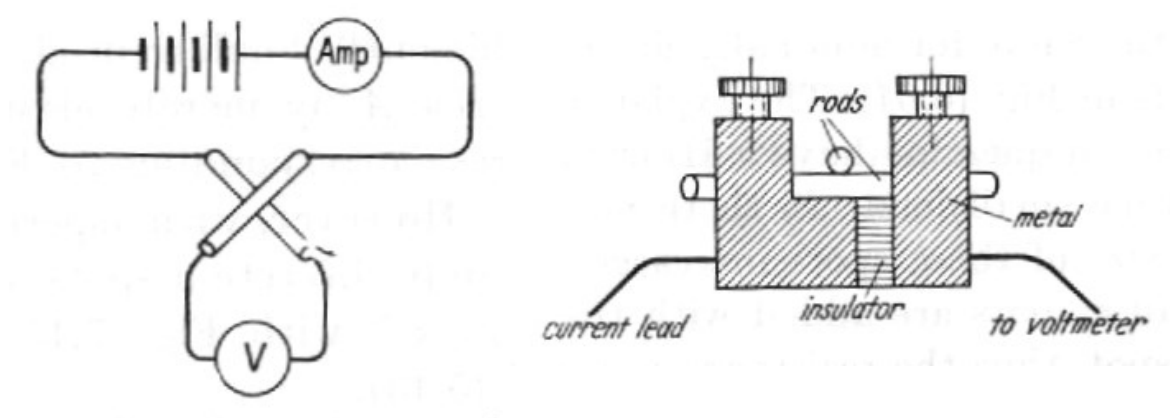
7.3.6 Výsledné rezistivity

materiál:	měď	hliník	mosaz	ocel
$\rho \cdot 10^{-9} (\Omega \cdot \text{m})$	17,30	45,24	61,07	255,00

Tabulka 2 Výsledný měrný odpor pro jednotlivé vzorky materiálu

7.4 Měření napětí měknutí

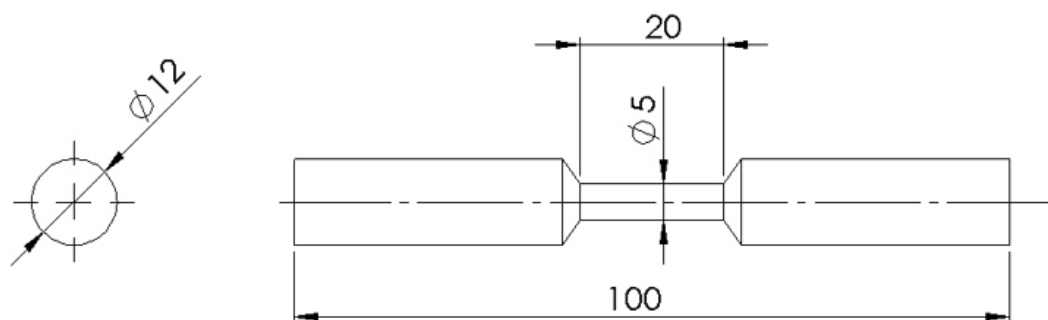
Měření provedeme následovně: Nejdříve necháme výroky obrobít na přesně požadovaný tvar, poté je položíme do kříže do stojanu speciálně určenému pro naše měření, aby se vzájemně dotýkaly ideálně jen jedním bodem (styk typu zkřížených válců) a byly k sobě přitlačovány jenom malou silou tak, aby docházelo k co největšímu úbytku napětí. Tyto přípravky opět připojíme na zdroj a budeme měřit stykový odpor kontaktů opět Ohmovou metodou. Průběhy veličin budeme zaznamenávat do PC a z výsledných dat bychom měli být schopni vyhodnotit napětí měknutí kontaktů. Kromě úbytku napětí na kontaktech a proudu jimi procházejícím budeme měřit též teplotu na povrchu kontaktu co nejbližší k místu styku, též teplotu okolí na přípravku pro podložení vzorků.



Obrázek 14 Charakteristika $R(U)$ pro metrové vzorky materiál

7.4.1 Úprava vzorků materiálu před měřením

Abychom mohli měřit napětí měknutí, musíme metrové tyče nechat obrobít na požadované rozměry.



Obrázek 15 Úprava vzorku rozměry

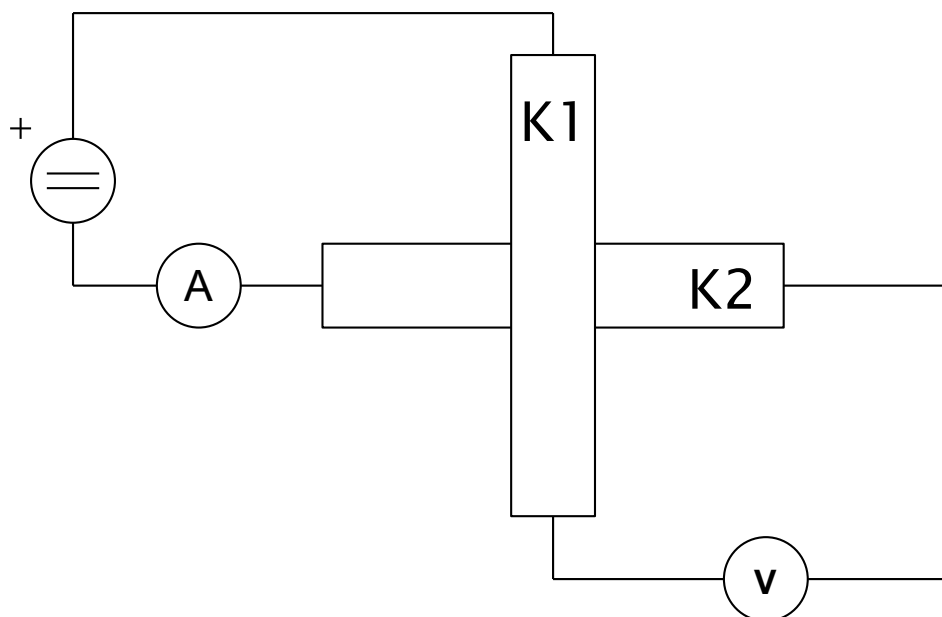
Do středů průřezů z obou stran necháme udělat závit, aby bylo možné do vzorku namontovat šrouby, které budou sloužit jako svorka pro měření napětí. Teplotní sonda bude připevněna na široké části vzorku co nejblíže k zúžení. Příklad upravených vzorků můžete vidět na obrázku níže:



Obrázek 16 Vzorky materiálu připravené k měření

7.4.2 Ohmova metoda pro měření napětí stykového odporu kontaktů

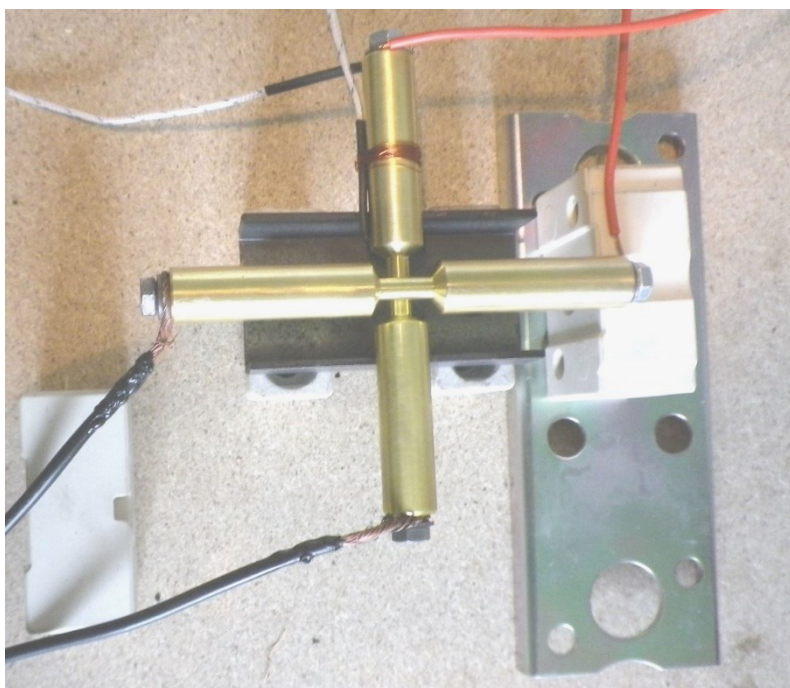
V tomto případě použijeme opět stejnou Ohmovu metodu s tou úpravou, že úbytek napětí nebudeme měřit na jednom vzorku ale mezi kontakty.



Obrázek 17 Schéma zapojení Ohmovy metody pro měření stykového odporu

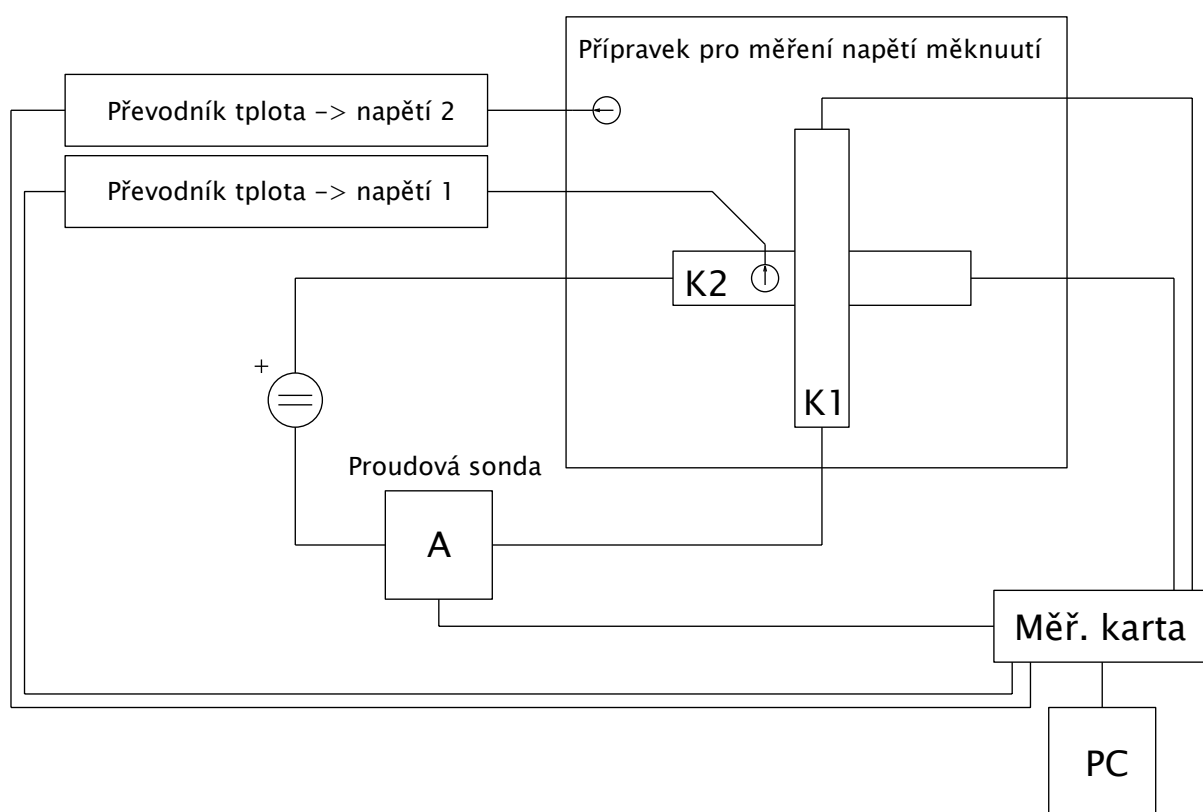
7.4.3 Postup měření

Z důvodu dosažení dostatečně malé kontaktní síly, aby byl úbytek napětí dostatečně velký na dosažení hodnoty napětí měknutí daného materiálu, usadíme vzorky do speciálně k tomu určeného přípravku.



Obrázek 18 Vzorky materiálu usazené do přípravku pro měření.

Dále budeme postupovat obdobně jako u měření rezistivity vzorků materiálu. Na zdroji budeme opět schodovitě přidávat proud po 5 A od 0 A do 40 A a poté snížíme plynule proud zpět k 5 A, aby se nám vzorky kontaktního materiálu příliš nezahřály. Výsledky budeme zaznamenávat do PC a jejich vyhodnocením bychom měli být schopni získat napětí měknutí zkoumaných materiálů a část jejich $R(U)$ charakteristik. Dalším rozdílem od předchozího měření je, že odpor styku kontaktů závisí v tomto případě na teplotě, proto budeme měřit teplotu na povrchu kontaktu (na široké části vzorku co nejbližší k části úzké) a zároveň teplotu okolí sondou umístěnou na přípravku. Teploty jsou zaznamenány teplotními sondami, které jsou zapojené v převodníku teploty na napětí a ten je zapojen opět do měřicí karty. Blokové schéma měření můžete vidět níže:



Obrázek 19 Blokové schéma měření napětí měknutí

7.4.4 Prvky měřicí soustavy

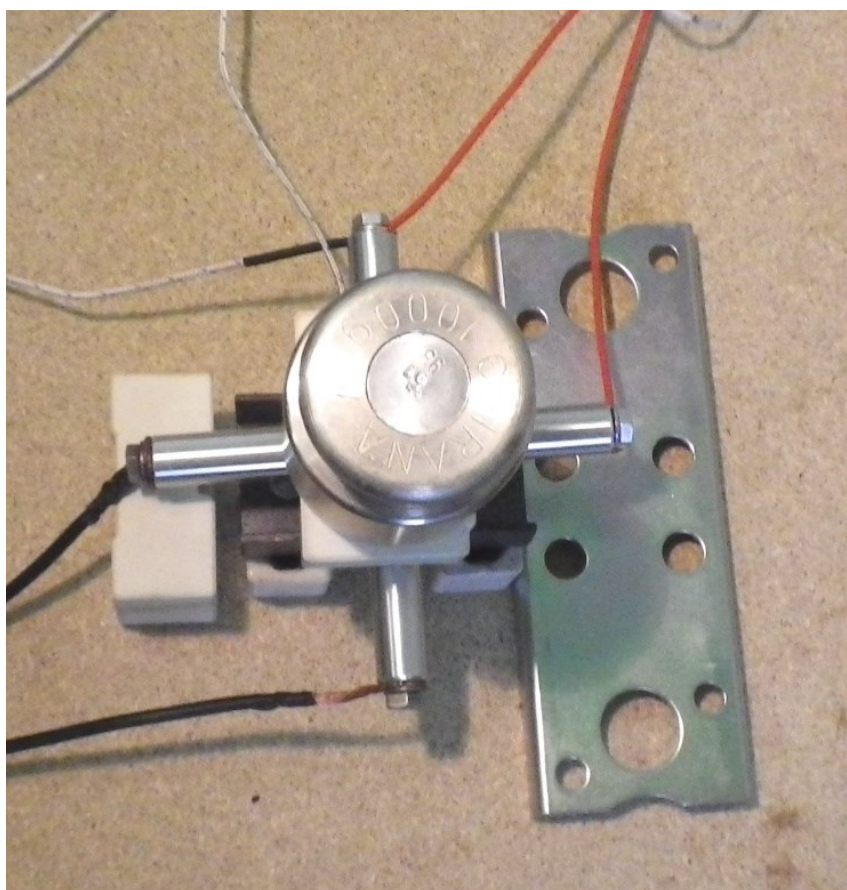
Většina prvků měřicí soustavy je stejných jako při měření rezistivity materiálů. Navíc jsou v soustavě přidány sondy pro měření teploty a převodníky teploty na napětí.

Převodníky teplota/napětí

Při měření teploty používáme převodníky PT01 se vstupem 0–1200 °C a výstupem 0–10 V.

7.4.5 Specifikum u měření hliníku

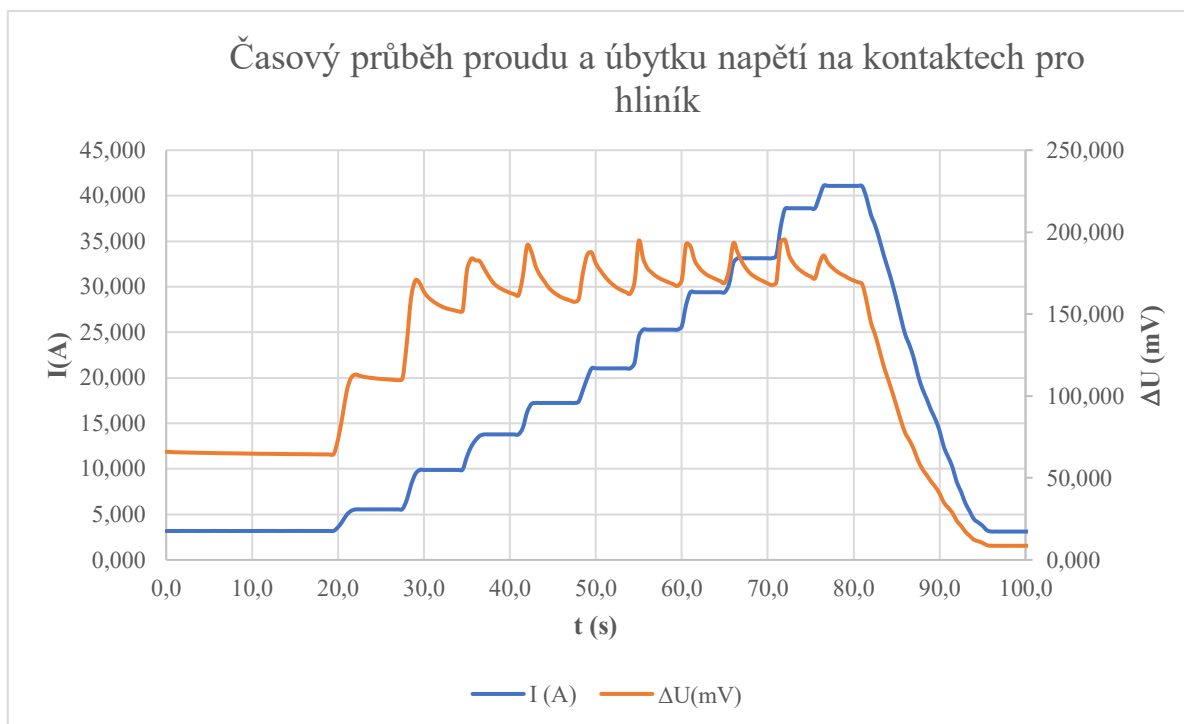
U hliníku jsme museli pro dosažení relevantních výsledků zvýšit kontaktní sílu, a to pomocí umístění závaží nahoru na přípravek.



Obrázek 20 Přípravek doplněný o závaží

7.4.6 Zaznamenaný časový průběh

Z měření nám vyjdou průběhy úbytku napětí na kontaktech, proudu a teplot v závislosti na čase. Proto se nyní pojdme podívat na jeden konkrétní z nich, a to konkrétně pro hliník. Diskusi časového průběhu provedeme pouze pro jeden ze vzorků (hliník). Bude to dostačující, jelikož průběhy všech materiálů se liší pouze konkrétními hodnotami, nikoliv však principiálně. Pro konkrétní hodnoty pro nás však budou mnohem důležitější $U(I)$ charakteristiky daného materiálu.



Obrázek 21 Časový průběh úbytku napětí a proudu změřený na kontaktech pro hliník

Na zaznamenaném průběhu můžeme vidět schodovitý nárůst proudu, vzniklý postupným nastavováním na stejnosměrném zdroji. Zajímavější je však průběh úbytku napětí. Abychom ho mohli popsat, musíme se nejdříve podívat na jeho analytické vyjádření.

$$(33) \quad \Delta U = R_S \cdot I$$

$$(34) \quad \Delta U = (R_u + R_p) \cdot I$$

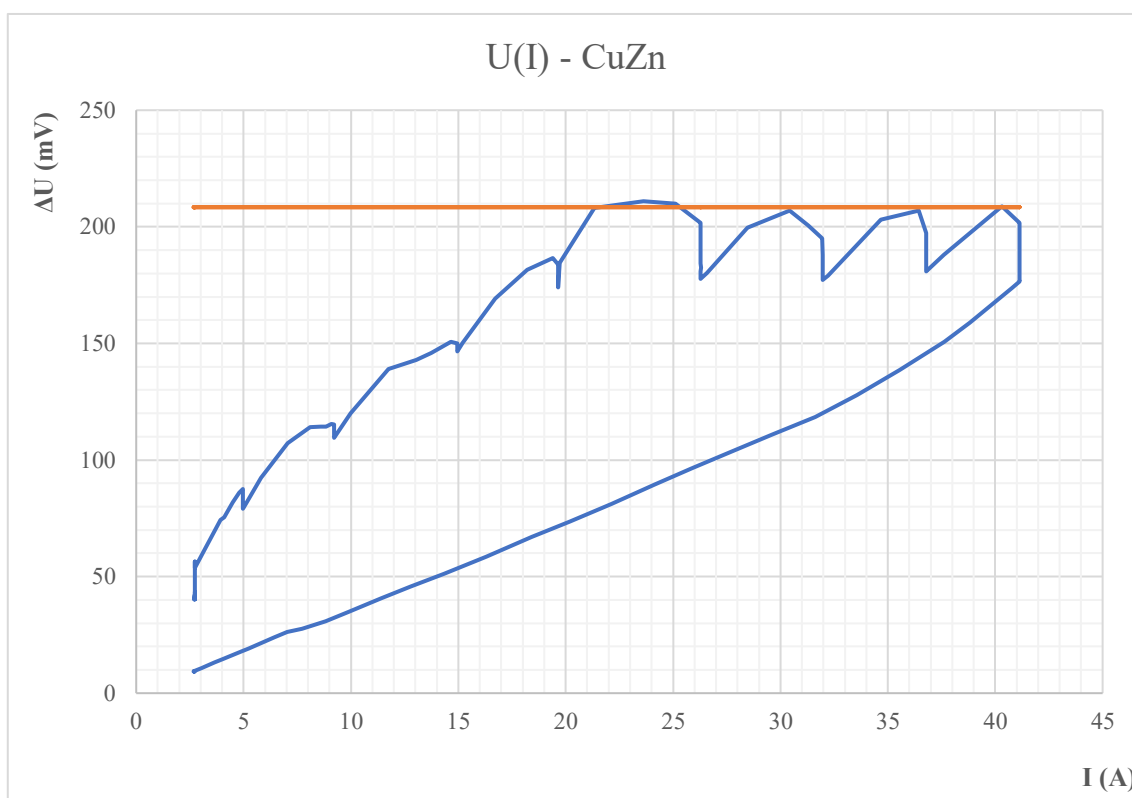
$$(35) \quad \Delta U = \left(\frac{q_0(1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)}{c_{tv} \cdot \sqrt[3]{\frac{F_k r_k n^2}{E}}} + R_p \right) \cdot I$$

Průběh úbytku napětí vypadá takto: Nejdříve schodovitě stoupá společně s proudem, což je dáno, jak nárůstem proudu, tak odporu. Od 30 A dále však vidíme vždy jeho strmý nárůst odpovídající schodovému nárůstu proudu, ale v čase mezi jednotlivými nárůsty proudu vždy exponenciálně klesá zpět na svoji hodnotu předcházející danému nárůstu proudu. Tento jev lze vysvětlit dosažením úbytku napětí v místě styku odpovídajícímu napětí měknutí pro daný materiál, což způsobí změknutí mikroskopické struktury materiálu v kontaktním bodě, čímž vlivem přítlačné síly dojde k zvětšení kontaktní mikro plošky, čímž se nám sníží odpor úžiny a úbytek napětí poklesne. Tento cyklus se opakuje ještě několikrát při každém dalším proudovém nárůstu. Nakonec po dosažení maximální hodnoty proudu zdroje a jeho plynulém snížení na původní hodnotu lze pozorovat i plynulý pokles úbytku napětí, a to až pod hodnotu, kterou měl ještě před započítím měření, což odpovídá tomu, že změna kontaktní plochy vlivem měknutí materiálu je trvalá. Kdybychom však měli k dispozici silnější zdroj proudu, mohli bychom pokračovat ve schodových nárůstech tak dlouho, dokud by nedošlo k dosažení napětí svaření a následnému svaření kontaktů, což by se v průběhu projevilo velkým poklesem úbytku napětí, a dále by již průběh odpovídal pouze průběhu kontaktních materiálů daných rozměrů, nikoliv průběhu na kontaktní úžině.

7.4.7 Vynesení $U(I)$ charakteristik a vyhodnocení napětí měknutí pro jednotlivé materiály

Pro vyhodnocování napětí měknutí materiálu se mnohem lépe, než časový průběh hodí charakteristika $U(I)$. Nyní tyto charakteristiky vyneseme a vyhodnotíme postupně pro každý materiál zvlášť.

Mosaz



Obrázek 22 $U(I)$ charakteristika pro mosaz

V charakteristice můžeme opět sledovat děj probíhající na kontaktním ústrojí, tentokrát však z pohledu úbytku napětí v závislosti na proudu. Opět vidíme, jak úbytek napětí stoupá téměř rovnoměrně s proudem, malé skoky s proudovým schodem a drobné nerovnoměrnosti způsobuje rozdíl ohřátí a ochlazení vzorků během pauzy mezi proudovými skoky a doby měření. Od 22 A se nám ukazuje již dříve zmiňovaný děj dosažení napětí úbytku napětí rovného napětí měknutí, poté prudký pokles úbytku, opětový nárůst a znovu několikrát dokola. Poté již jen plynulý pokles úbytku napětí společně s proudem pod původní hodnotu.

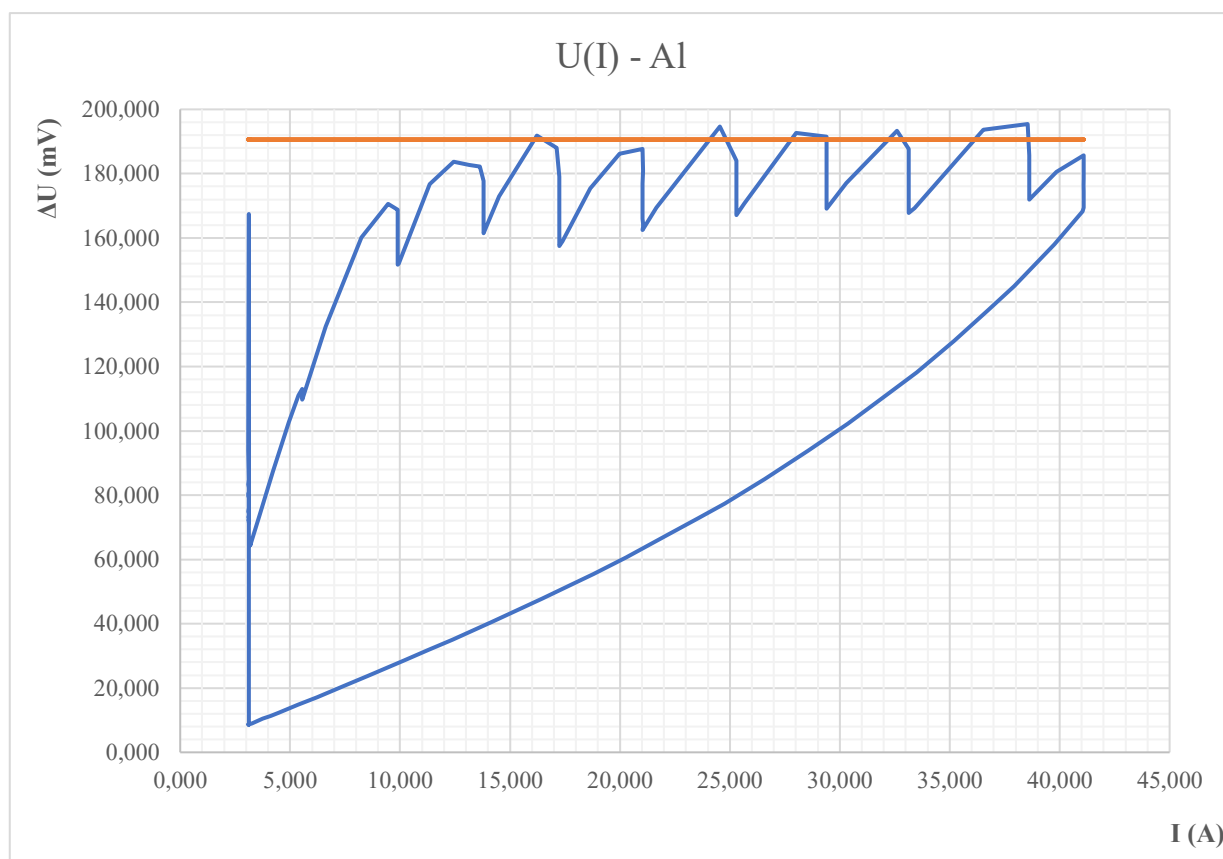
Napětí měknutí materiálu daného vzorku získáme z této charakteristiky velmi jednoduše: Odečteme hodnoty úbytku napětí ve všech místech, kde dosahuje hodnoty napětí měknutí a jejich aritmetický průměr budeme brát za výslednou hodnotu našeho měření.

	ΔU (mV)	I (A)
1	210,97	23,624
2	207,05	30,431
3	206,90	36,446
4	208,70	40,314
prům.	208,40	

Tabulka 3 Změřené napětí měknutí pro vzorek mosazi

Výslednou hodnotu pak zaneseme do $U(I)$ charakteristiky (viz. oranžová přímka). Jelikož se průběh a postup pro ostatní materiály liší pouze konkrétními hodnotami, výsledky měření pro další vzorky uvedeme bez jejich diskuse.

Hliník

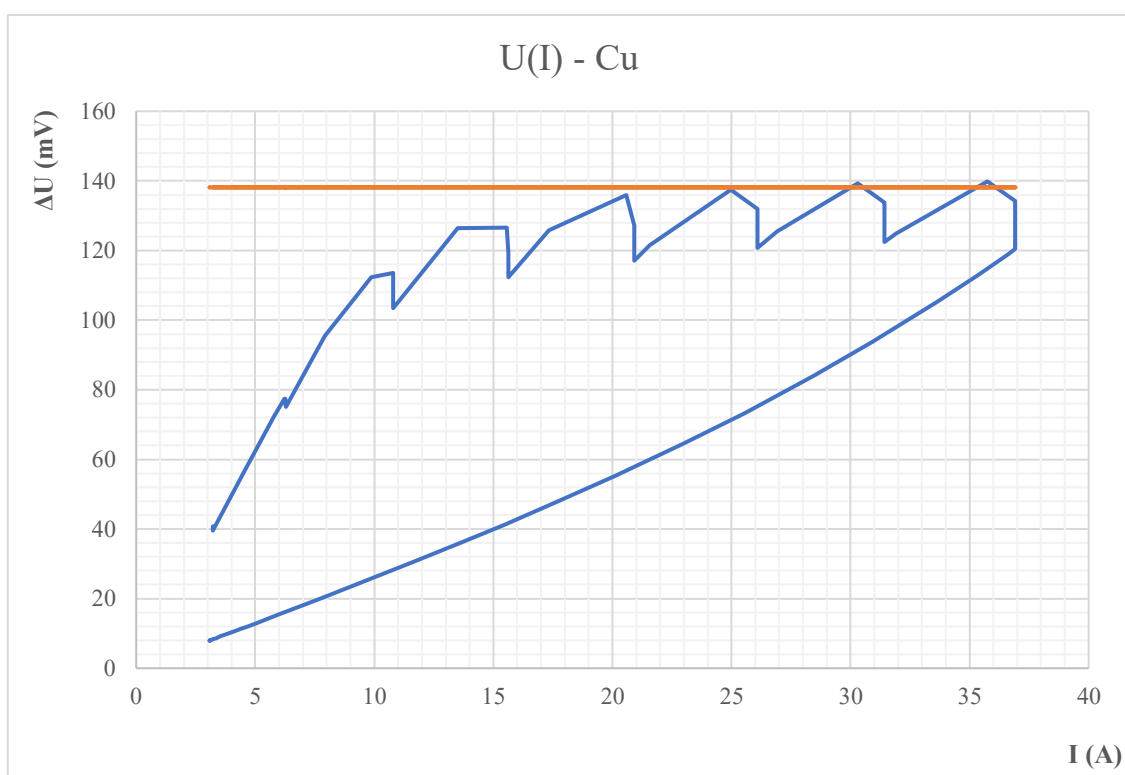


Obrázek 23 $U(I)$ Charakteristika pro hliník

	ΔU (mV)	I (A)
1	183,73	12,449
2	191,77	16,228
3	187,64	21,028
4	194,65	24,540
5	192,70	28,005
6	193,25	32,609
7	195,44	38,538
8	185,77	41,084
prům.	190,62	

Tabulka 4 Změřené napětí měknutí pro hliník

Měď

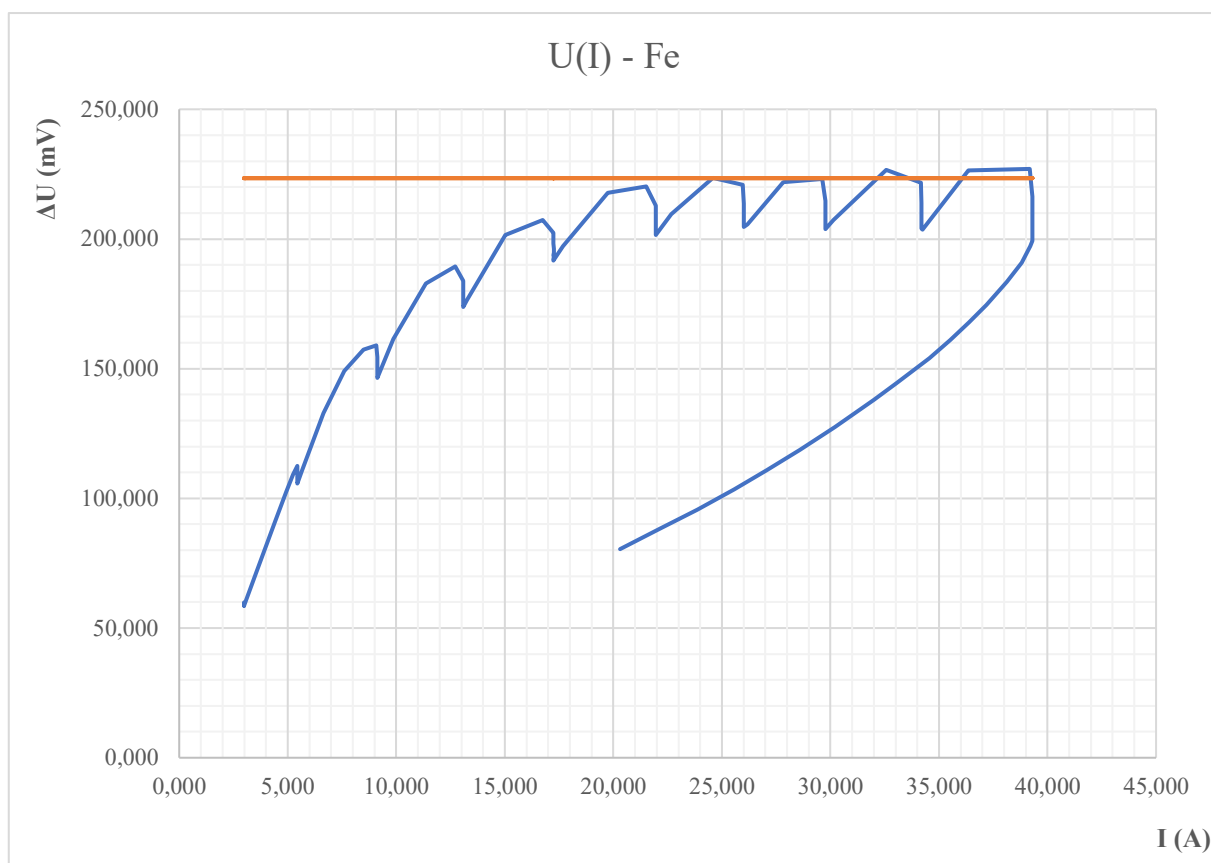


Obrázek 24 U(I) charakteristika pro vzorek mědi

	ΔU (mV)	I (A)
1	135,94	20,59
2	137,50	24,96
3	139,26	30,31
4	139,85	35,76
prům.	138,14	

Tabulka 5 Naměřené napětí měknutí pro měď

Ocel



Obrázek 25 $U(I)$ charakteristika naměřená pro ocel

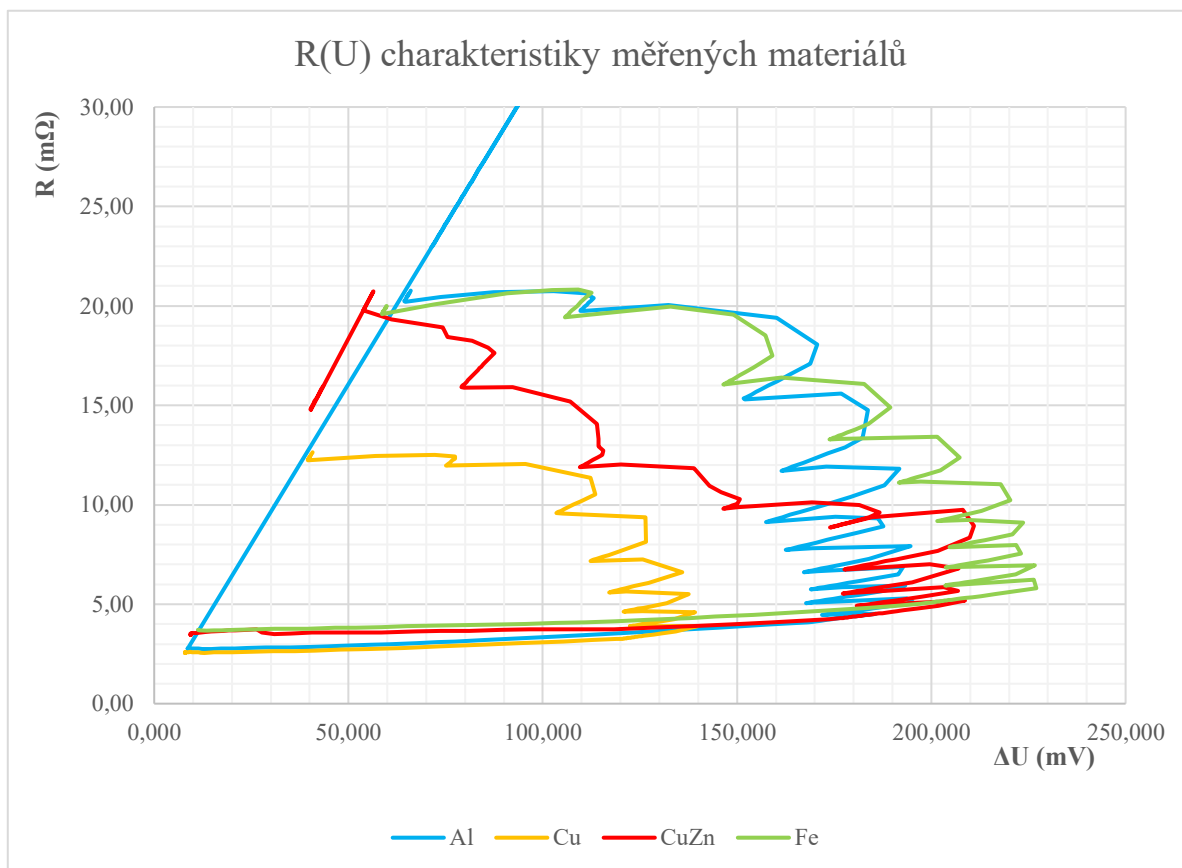
	$\Delta U \text{ (mV)}$	$I \text{ (A)}$
1	220,27	21,52
2	223,64	24,59
3	223,13	29,62
4	226,70	32,56
5	227,02	39,18
prům.	223,44	

Tabulka 6 změřené teploty měknutí pro vzorek oceli

7.5 Vynesení R(U) charakteristik

Nyní vyneseme pro jednotlivé vzorky materiálu R(U) charakteristiku, která je pro každý materiál typická. Tyto R(U) charakteristiky udávají, jak se mění odpor kontaktů daného materiálu v závislosti na úbytku napětí, ten je veličinou, která udává oteplení kontaktu. Pro upřesnění je nutno dodat, že vyneseme pouze jejich část, která končí napětím měknutí, kdežto kompletní by musela pokračovat až do napětí svaření kontaktů. Dosáhnout dostatečného proudu, který by způsobil dostatečný úbytek napětí, aby došlo ke svaření materiálu, nám neumožní stejnosměrný zdroj.

Pro možnost porovnání charakteristik pro různé typy materiálu vyneseme všechny tyto charakteristiky do jednoho grafu.



Obrázek 26 Naměřené R(U) Charakteristiky pro zkoumané vzorky materiálu

Na této charakteristice můžeme vidět stejné průběhy jako na charakteristikách U(I), jen v závislosti odporu na úbytku napětí, který je charakteristický pro oteplení místa styku kontaktů. Z charakteristiky můžeme vidět, že nejdříve měkne vzorek mědi, poté hliníku, následně mosazi a nakonec oceli.

7.6 Kontrolní výpočet

Průběh charakteristiky bychom mohli ověřit výpočtem, kdyby se nám nevyskytl problém s měřením teplot, ten rozeberu později. Nejdříve však uvedu rovnice pro výpočet.

Mezi úbytkem napětí a odporem úžiny platí vztah:

$$(35) \quad U_K = R_U \cdot I \quad (2, \text{s. } 194)$$

Rovnice Holm-Kohlrauschova:

$$(36) \quad \frac{U_K^2}{8\varrho_0\lambda} = (\vartheta_S - \vartheta_P) + \frac{\alpha}{2}(\vartheta_S^2 - \vartheta_P^2) \quad (2, \text{s. } 194)$$

Kde ϑ_S je teplota v místě styku kontaktů a ϑ_P teplota v místě dostatečně vzdáleném, aby v něm již nedocházelo k oteplení skrze vliv kontaktů.

Z této rovnice již můžeme odvodit:

$$(37) \quad U_K^2 = \left((\vartheta_S - \vartheta_P) + \frac{\alpha}{2}(\vartheta_S^2 - \vartheta_P^2) \right) 8\varrho_0\lambda$$

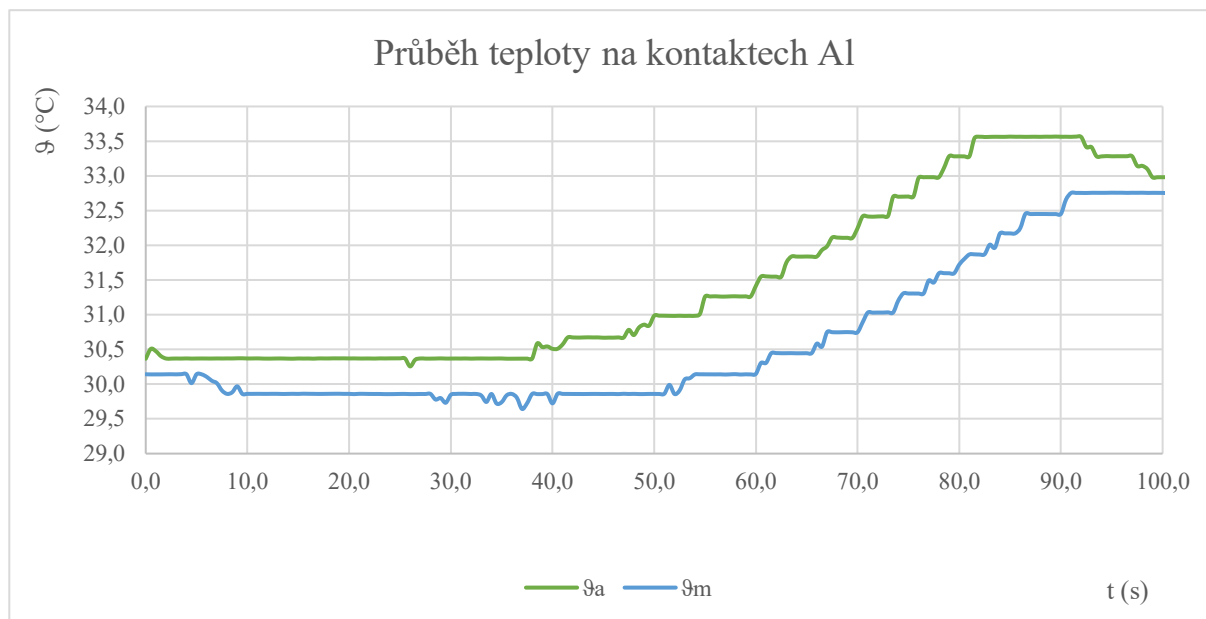
$$(38) \quad U_K = \sqrt{\left((\vartheta_S - \vartheta_P) + \frac{\alpha}{2}(\vartheta_S^2 - \vartheta_P^2) \right) 8\varrho_0\lambda}$$

$$(39) \quad R_U = \frac{\sqrt{\left((\vartheta_S - \vartheta_P) + \frac{\alpha}{2}(\vartheta_S^2 - \vartheta_P^2) \right) 8\varrho_0\lambda}}{I}$$

Je rovnice, podle které bychom mohli dopočítat odpor úžiny pro ověření změřených $R(U)$ charakteristik.

7.6.1 Problém s naměřenou teplotou

Pro ilustraci problému s naměřenou teplotou nejdříve uvedu její časový průběh pro měření jednoho materiálu:



Obrázek 27 Teplotní průběh zaznamenaný při měření vzorku hliníku

Z průběhů můžeme vyčíst hned 2 problémy. Zaprvé ten, že i hodnota vzdáleného bodu kopíruje v čase tvarově průběh teploty, která je změřena v co největší blízkosti místa styku kontaktů, z čehož plyne, že jsme vybrali bod příliš blízký. Na druhou stranu můžeme pozorovat, že napětí měřené v místě styku kontaktů se ani zdaleka neblíží teplotě 150 $^{\circ}\text{C}$, která je teplotou měknutí hliníku (1, s. 436), z čehož plyne, že teplotní sonda byla při měření příliš vzdálena od místa styku kontaktů vůči tomu, v jak malém měřítku dochází k měknutí materiálu. Řešením by bylo umístit sondu pro bod vzdálený ještě dále od místa styku kontaktů, a sondu pro bod blízký ještě více přiblížit, nebo lépe použít silnější proudový zdroj, čímž by probíhalo měknutí ve větším měřítku, a to včetně změn teploty místa styku.

7.7 Porovnání naměřených hodnot s tabulkovými

Jelikož se nám díky nedokonalé změřeným teplotám nepodařilo ověřit výsledné $R(U)$ charakteristiky materiálů a tím ani jejich napětí měknutí výpočtem, zkusíme ho porovnat alespoň s tabulkovými hodnotami, které jsme našli v dostupných zdrojích.

	U_x (mV) měř.	U_x (mV) (1, s. 438)	U_x (mV) (3, s. 197)	Δ (mV)	δ (%)
Al	190,6	100	x	90,62	90,62
Cu	138,1	120	120	18,14	15,12
CuZn	208,4	x	x	x	x
Fe	223,4	210	x	13,44	6,40

Tabulka 7 Porovnání naměřených napětí měknutí s tabulkovými

V porovnání vidíme naměřené hodnoty napětí měknutí pro jednotlivé materiály a tabulkové hodnoty těchto napětí podle profesora Holma a podle profesora Dubravce, dále pak absolutní odchylku hodnoty naměřené od hodnoty tabulkové a též relativní odchylku. Nyní se podíváme na jednotlivé materiály podrobněji:

Hliník

U hliníku nám vyšla hodnota skoro dvojnásobná oproti tabulkové, což odpovídá i téměř dvojnásobné rezistivitě našeho vzorku materiálu, nejspíše způsobené povrchovými vrstvami oxidu nebo nečistot.

Měď

Měď se nám podařila změřit úspěšně, jelikož chyba je v rámci měření jenom malá, ta může být způsobena jednak příměsemi v materiálu oproti čisté Cu, jednak opět povrchovými vrstvami.

Mosaz

O napětí měknutí mosazi se nám nepodařilo sehnat tabulkové záznamy, z teorie však lze jen odhadnout, že jelikož má mosaz jen o něco málo nižší teplotu měknutí a značně vyšší rezistivitu, mělo by být napětí měknutí větší než u mědi.

Ocel

Měření pro ocel bylo nejúspěšnější ze všech, oproti tabulkové hodnotě se liší nejméně ze všech ostatních vzorků, tento rozdíl je pak způsoben nejspíše příměsemi v materiálu.

8 Závěr

V této práci jsme za pomoci Ohmovy metody změřili nejdříve měrný odpor a posléze napětí měknutí a $R(U)$ charakteristiky čtyř vzorků materiálu, konkrétně: hliníku, mědi, mosazi a oceli. Měření se zdařilo vzhledem k jednoduchosti měřicí soustavy úspěšně, nejlépe pak pro vzorek oceli (odchylka pod 10 %) a mědi (odchylka pod 20 %). Nejhůře se vedlo při měření hliníku, jelikož ten velmi snadno oxiduje za atmosférických podmínek, tudíž se při jeho měření projevil odpor cizích vrstev. U mosazi nebylo možné výsledky ověřit kvůli nenalezitelnosti tabulkových záznamů v dostupných zdrojích. Pro ověření výpočtem by bylo nutné upravit měření teplot v naší měřicí soustavě, nebo mít k dispozici zdroj proudu s větším rozsahem, což by mělo celou řadu dalších výhod, jako např. možnost kromě napětí měknutí měřit i napětí svaření, též by se snížil vliv cizích vrstev na změřené výsledky. Kvůli neúplnosti dostupných tabulek a důležitosti elektrických kontaktů na poli energetiky, by bylo perspektivní, za podmínky upravení a zpřesnění měřicí soustavy, měření realizovat i pro další materiály, zejména pak pro konkrétní běžné kontaktní materiály.

Literatura

- (1) HOLM, Ragnar a J. BRIAN, P. WILLIAMSON. *Electric contacts: theory and applications*. 4th completely rewritten edition 1967 3rd printing. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. ISBN 3540038752.
- (2) BUTKEVIČ, G. V. Elektrické kontakty. BUL', Boleslav a VI. SUCHÁNEK. *Elektrické přístroje: Základy teorie*. 1 vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977, s. 121 - 182.
- (3) DUBRAVEC, Bohuslav. Elektrické kontakty. HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. 1 vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, s. 173 - 202.
- (4) DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: učební text*. První. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- (5) Gebr. Kemper GmbH + Co. KG: CU-ETP [online]. Olpe: Kemper, 2013 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.kemper-olpe.de/cz/oblasti-cinnosti/pasy/material/medi/cu-etp/>
- (6) Poly Lanema: AW 2030 [online]. Ovar: Poly Lanema, 2021 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/aw2030-datasheet_1511.pdf
- (7) ALMAG: DATSHEET: 39Pb3 CW614N [online]. Roncadelle (BS): AZIENDA LAVORAZIONI METALLURGICHE E AFFINI GNUTTI, 2019 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <http://www.almag.it/en/pdf/39PB3-CW614N-TN-EN.pdf>
- (8) Steel Navigator OVAKO: S235JR [online]. Stockholm: Ovako, 2021 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/s235/>
- (9) Ceny a vlastnosti oxidu hlinitého 99% [online]. Zug: Institute for Rare Earths and Metals AG, 2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://cs.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-sonder-metalle/aluminium/aluminium-oxide-99/>